

## TÉCNICAS MEJORADAS DE LIXIVIACIÓN MINERALES DE COBRE EN PILAS

### 1. INTRODUCCION

La lixiviación en pilas es un proceso industrial ampliamente difundido para el beneficio de minerales con especies oxidadas y con sulfuros secundarios de metales base –en este caso, principalmente con técnicas bacterianas- y que ya se intenta y explora intensamente para el tratamiento de sulfuros primarios.

Las metodologías usadas se originaron en el procesamiento de minerales oxidados y generalmente se basan en pruebas metalúrgicas y en la experiencia industrial, que terminan por relacionar las variables económicas primarias (recuperación, consumo de ácido y cinética) con las condiciones adoptadas (granulometría de mineral, dosis de ácido en curado, tasa de riego, altura de apilamiento y aplicación de soluciones de riego con alguna forma de contracorriente), para obtener resultados que se expresan en las duraciones de los ciclos de tratamiento y en las concentraciones de las especies en las soluciones ricas.

Los avances en este tema al presente también permiten un enfoque diferente, basado en reconocer las características y el comportamiento del mineral, para separar simultáneamente aquellas que deben respetarse de los que muestran grados de libertad disponibles, de modo que sea posible conciliar ambos tipos de aspectos para establecer y lograr un objetivo más bien basado en los criterios económicos de una operación completa.

## 2. DESARROLLO DE UN PROYECTO NUEVO O DE MODIFICACIÓN DEL EXISTENTE

### 2.1 FASES DE UN PROYECTO

Un proyecto hidro-metalúrgico pasa por varias fases típicas y formales hasta su concreción en una planta en operación.

**Previamente** están las etapas geológicas de exploración, seguidas de los análisis mineros y estudios metalúrgicos en laboratorios, y a veces en planta piloto, que se resumen en una etapa de Estudios de Factibilidad.

**La etapa de Ingeniería Conceptual**, está destinada a definir el “negocio” propiamente tal, mediante el análisis de varias opciones alternativas que permiten establecer los riesgos asociados y requerimientos de implementación que definen las inversiones y costos, para la capacidad de producción y condiciones usadas en cada una de las opciones analizadas, cuyas ventas respectivas validan y sustentan el proyecto y definen los costos e inversiones aproximadas y se calculan y sensibilizan los indicadores econométricos que permiten comparar las alternativas entre sí, en el contexto de rentabilidad establecido por el propietario.

**La etapa de Ingeniería Básica** se inicia con un proyecto que luce sustentable y atractivo. En ella se terminan de comparar las mejores opciones de la etapa conceptual y se concluye con las características del proyecto completamente definido en aspectos tales como: balances de masa y energía, implementación de componentes dimensionados o especificados, disposiciones de planta, trazados de líneas de potencia, control e hidráulicas, inversiones y costos definitivos y el programa de ejecución.

**La Ingeniería de Detalles** define completamente lo necesario para permitir las fabricaciones, construcciones y montajes que se usarán en la implementación del proyecto mediante las adquisiciones de equipos y las actividades de construcción, montajes y puesta en marcha y establece hasta las bases de contrato de la participación de proveedores y contratistas.

Ya en los estudios y en la conceptualización de un proyecto definitivo se adoptan una serie de decisiones, que asumen la condición de parámetros y criterios de diseño, cuyo origen no siempre está claro ni tampoco se establecen directamente a partir de un análisis con fuentes de datos. Entre ellos están los parámetros relativos a los procesos, a la configuración de la planta y sus sistemas y al diseño o selección de equipos de diversa naturaleza.

A continuación se revisan los aspectos involucrados y los criterios previos que permiten generar los factores que denominamos **“Parámetros y Criterios de Diseño y Operación de un Proyecto”** y que constituyen la base de las etapas de ingeniería que permiten su implementación, advirtiendo que se excluirán las etapas mineras, dadas las particularidades de cada proyecto, y las etapas de chancado, dado el conocimiento que se tiene sobre ellas.

Por razones del alcance del documento, sólo son desarrollados los parámetros y criterios usados en la configuración de procesos de la planta y hasta los cálculos de Balances de Masas y quedan excluidos los criterios específicos de ingeniería que definen los equipos e instalaciones de la planta.

## 2.2. CRITERIOS Y CONDICIONES GENERALES

El objetivo de un proyecto minero metalúrgico es directo, simple y similar al de cualquier proyecto empresarial y se reduce a **generar utilidades**.

Consecuentemente vale la pena revisar los aspectos económicos generales que definen el comportamiento económico en el ámbito particular de un proyecto de planta hidro-metalúrgica, a través de la estadística acumulada en proyectos ya materializados.

### - LAS INVERSIONES:

Una revisión de la distribución de las inversiones posteriores a las de la etapa minera –que se excluye por su alta varianza- muestra que las inversiones por áreas de la planta, se sitúan en los siguientes órdenes de magnitud:

<b>Área LX</b>	Incluidas: recepción de mineral en acopios chancados, aglomeración, carga de pilas e instalaciones de riego, recolección, almacenamiento y manejo de soluciones.	<b>Presenta inversiones el 12 y el 25% del total.</b>
<b>Área SX</b>	Incluidas instalaciones y equipos mezcladores-decantadores completos, estanques, inventario de orgánico y otros.	<b>Presenta inversiones del orden del 30 al 50 % del total.</b>
<b>Área EW</b>	Incluidas la nave electrolítica, rectificadores, grúa, celdas equipadas con electrodos, sistema de lavado de cátodos, estaques, intercambiadores y otros.	<b>Presenta inversiones del orden del 45 al 55% del total.</b>

Respecto de la distribución de las inversiones (sin administración), puede indicarse que:

**En Equipos** : Representan del orden del 50 - 60 % del total

**En Construcciones y Montajes** : Representan del orden del 40 -50 % del total

- **LOS COSTOS:**

Respecto de los costos directos de operación, su distribución muestra que se sitúan en los siguientes órdenes de magnitud general en las áreas de una planta

**Área Extracción Mina y LX:** En general acumula más del 50 % de los costos directos, con fuerte variación entre las diversas operaciones, por factores asociados al manejo de materiales.

**Área LX:** En general con fuerte variación y muy afecta a los resultados de recuperaciones metalúrgicas y consumos de reactivos.

**Área SX y EW Combinadas:** Presenta costos virtualmente constantes, en un rango entre 55 y 50 centavos/lb.

- **LOS FACTORES DE SENSIBILIDAD:**

Dado que el objetivo es generar utilidades, y su enemigo principal son los **factores de riesgo**, vale también la pena revisar los factores principales y más incidentes en la sensibilidad de un negocio minero – hidrometalúrgico, según las estadísticas de los analistas:

**Primer Factor** : El precio del cobre.

**Segundo Factor** : El tamaño del yacimiento, en términos de toneladas y leyes de fino, por factores asociados a la economía de escala.

**Tercer Factor** : La recuperación metalúrgica.

**Cuarto Factor** : Habitualmente es el consumo de ácido.

**Factores Siguietes** : Más variados y asociados a cada caso particular, tales como: presencia de impurezas, disponibilidad de agua, de energía, de elementos de infraestructura, de espacio, financiamiento, factores ambientales y otros varios.

## **OBSERVACIÓN GENERAL**

Las variaciones en los costos son más incidentes que las inversiones en la sensibilidad y en el éxito del proyecto. Así, las modestas inversiones en lixiviación deben traducirse en

recuperaciones y consumos consistentes y asegurados para abastecer confiablemente las etapas siguientes y evitar las variaciones de costos y producción del proyecto.

### **CONCLUSIONES ORIENTADORAS**

Como conclusión de los antecedentes estadísticos se deducen varias recomendaciones generales e iniciales para enfocar un proyecto:

- Dado que el principal factor de riesgo está asociado al precio, sólo cabe contrarrestarlo mediante un proyecto diseñado para operar a costos bajos, o para generar productos que mejoren la producción y el margen de contribución, más bien que diseñado para aumentar el valor agregado de sus productos.
- Se acepta que los riesgos asociados al tamaño del yacimiento pueden soslayarse en alguna medida, mediante una adecuada “estrategia de negocio” aplicable a operaciones menores, pero siempre atendiendo a la conclusión anterior.
- Dado que los indicadores econométricos de un proyecto son menos sensibles a las inversiones que a los costos es más atinado cuidar que ellas sean efectuadas con lógica, antes que procurar economías en esos rubros, principalmente desde los puntos de vista de su capacidad de producir a costos bajos y de permitir una alta disponibilidad de planta.
- Se enfatiza que la concepción de procesos y de operación de la lixiviación debe ser especialmente cuidada, dado que los mayores costos de operación y factores de sensibilidad del proyecto radican en las recuperaciones y consumos de esa etapa.
- Ya que las menores inversiones proporcionales también se ubican en el área lixiviación, es incluso aconsejable exagerarlas razonablemente a cambio de disminuir los consumos y costos de manejo de materiales y de asegurar la obtención de altas recuperaciones metalúrgicas.

### **2.3. PARÁMETROS Y CRITERIOS DE DISEÑO DE LA LIXIVIACIÓN**

De acuerdo con las metodologías generales indicadas en la Introducción, las etapas de ingeniería se inician a partir de un Balance de Masas, que es el documento donde aparecen los primeros parámetros y criterios de procesos del proyecto.

Dado que al definir los diseños aparecen diversos factores restrictivos prácticos que los condicionan, (por ejemplo: disponibilidad de financiamiento, terreno, agua, energía,

condiciones climáticas y otros), conviene descubrirlos durante los estudios previos a la fase de Estudio de Pre-factibilidad para disponer del máximo de información sobre sus características de modo que, desde los primeros cálculos, se usen parámetros que se concilien con ellos mismos y con los resultados obtenidos a partir de ellos, y respeten todos los grados de libertad permitidos por los factores condicionantes y que además estén dentro de las preferencias y el interés del propietario.

Cabe mencionar además, que es prudente incorporar inmediatamente en los cálculos del Balance de Masas algunos factores relativos a la configuración de las instalaciones de planta –por ejemplo, referentes a la modulación de las pilas- para garantizar desde el principio la compatibilidad entre los requerimientos de procesos y la configuración de pilas y de planta capaces de satisfacerlos.

Como recomendación razonable, se sugiere efectuar sucesivas iteraciones de cálculos para ajustar todos los parámetros y condiciones de operación en forma simultánea, según los haya establecido el propietario, aunque sus decisiones provengan de las recomendaciones del mismo ingeniero.

Un listado típico de los criterios y parámetros que se usan en los cálculos de diseños de la etapa de lixiviación y sus fuentes de origen se encuentra en las tablas siguientes:

### PARÁMETROS DE LA LIXIVIACION

#### PRODUCCIONES COMERCIALES

Producción Nominal y de Diseño.	Por Propietario, desde etapa conceptual.
Días por año.	Por Propietario, desde etapa conceptual.
Factor de sobre-dimensionamiento.	Por Propietario, desde etapa conceptual.
Disponibilidad de Planta.	Por Propietario, desde etapa conceptual.

#### ANTECEDENTES DEL MINERAL:

Leyes de Cobre.	Por Propietario, desde etapa conceptual, en su antecedente geológico.
Leyes Solubles de Impurezas (Cl, Fe, Al, otros)	Por Propietario, dato medido en pruebas metalúrgicas.
Ley de Cloruros Solubles e Insolubles	Por Propietario, dato medido en pruebas metalúrgicas.
Abatimiento de Cloruros en Lixiviación	Por Propietario, dato medido en pruebas metalúrgicas.
Humedad Natural del Mineral	Por Propietario, dato medido en pruebas metalúrgicas.
Humedad de Impregnación del Mineral	Por Propietario, dato medido en pruebas metalúrgicas.
Densidad Aparente	Por Propietario, dato medido en pruebas metalúrgicas.

Tamaño de Partículas y Distribución	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Relación de Pesos "Ripio/Mineral"	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.

#### ANTECEDENTES DE PROCESOS DE LA LIXIVIACION

Recuperación Prevista	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Razón de Riego para % de Recuperación.	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Recuperación del Mineral Regado con PLS	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Altura del Apilamiento	Por Propietario, de pruebas metalúrgicas y por condicionamientos de espacio.
"Consumo Base" Total de Acido	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Consumo de Acido en la Recirculación de PLS	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Acido Agregado al PLS que Recircula a Riego	Por decisión de la configuración, basada en pruebas metalúrgicas.
Tasa de Evaporación	Por Propietario, dato medido en pruebas metalúrgicas y terreno.
Dosis de Líquido Para Aglomerar Mineral	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Consumo Total de Acido del Mineral	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Descarte de Refino	Por decisión de la configuración, basada en pruebas metalúrgicas.

#### OBJETIVOS

Rango de Concentración de Cobre en el PLS.	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Concentración de Acido Libre en PLS	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Concentración de Cloruros en PLS.	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.
Concentración de Impurezas en PLS.	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas.

#### CONFIGURACION

Altura de Apilamiento	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas y condiciones de terreno.
Cantidad de Módulos Instalados	Por decisión de la configuración, basada en pruebas metalúrgicas y estrategia.
Módulos a Regar con Refino	Por decisión de la configuración, basada en pruebas metalúrgicas y estrategia.
Tasa de Riego Instantánea.	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas y condicionantes.
% de Tiempo de Riego (si riego pulsante)	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas y condicionantes.
Tasa de Evaporación	Medición de terreno.
Factor de Lavado de Ripios (impregnación de solutos "final/inicial")	Por Propietario, de deducciones de pruebas metalúrgicas y condicionantes.



### CONSUMOS DE SERVICIOS

Pureza del Acido Comercial	Dato de proveedor.
Peso Especifico del Acido Sulfúrico	Dato de proveedor.
Tasa de Consumo de Aire de la Lixiviación (sólo en reposo)	Por decisión de la configuración, basada en pruebas metalúrgicas y estrategia.
Concentración de Cloruros, del Agua Industrial	Por Propietario, dato medido en terreno.
Concentración de Impurezas (Fe, Al, otros) del Agua Industrial de Reposición	Dato de fuente de agua o proveedor.

### ANTECEDENTES COMPLEMENTARIOS DE SX, DE EW Y DESCARTE DE ELECTROLITO

Eficiencia de Extracción en SX	De experiencia o asumido.
Relación O/A Externa en Etapas Extracción	De experiencia o asumido.
Concentración de Acido en Electrolito Rico	De experiencia o asumido.
Concentración de Cobre en Avance a EW	De experiencia o asumido.
Concentrac. de Cu, Descarga Celda Comercial	De experiencia o asumido.
Concentración de Cu, Electrolito Pobre a SX	De experiencia o asumido.
Selectividad Química Cu/Fe	De experiencia o asumido.
Arrastres de Acuoso en Orgánico a Estanque	De experiencia o asumido.
Eficiencia Separación Arrastres en TK Orgánico	De experiencia o asumido.
Densidad del Electrolito Descargado	De experiencia o asumido.
Concentración tolerable de Fe en Electrolito	De experiencia o asumido.
Concentrac. de Fe de Equilibrio en Electrolito	De experiencia o asumido.
Concentrac. de Cl <sup>-</sup> , Tolerable en Electrolito	De experiencia o asumido.
Concentrac. de Cl <sup>-</sup> , en Equilibrio en Electrolito	De experiencia o asumido.
Concentrac. de Cl <sup>-</sup> en Agua Desmineralizada	De experiencia o asumido.
Concentrac. Acido en Sol. de lavado Orgánico	De experiencia o asumido.

Se observa que en realidad todos los parámetros y criterios provienen directamente desde el propietario; algunos por un análisis económico anterior en la etapa conceptual y otros desde mediciones directas de terreno o de pruebas metalúrgicas.

Los más importantes resultan de los análisis efectuados a partir de los resultados de las pruebas metalúrgicas de lixiviación y de su conciliación con los factores condicionantes.

Es digno notar que:

- Varios parámetros son interdependientes y existe el problema de una sobre-determinación que los conduzca a conflictos si tal simultaneidad es imposibles.
- En consecuencia, deben ser establecidos en forma conciliada entre ellos y además, respetando la data establecida.



- Dada la importancia de los parámetros en el resultado económico, los revisaremos a partir de la data de las pruebas metalúrgicas y en el contexto de una "lixiviación ideal".

## 2.4. CARACTERÍSTICAS DE UNA "LIXIVIACIÓN IDEAL"

Sobre la base que el comportamiento del mineral puede ser dirigido hacia un comportamiento objetivo, dentro de ciertos límites, los requerimientos de una lixiviación ideal provienen de la propia lixiviación y otras se imponen como deseables por la Planta SX que procesará a continuación las soluciones que ella obtenga:

### OBJETIVOS DEL INTERÉS DE LA LIXIVIACIÓN:

- Debe maximizar la recuperación metalúrgica de las especies de valor,
- Debe minimizar los consumos de ácido y reactivos en general, de agua y de energía.
- Debe anular los efectos de eventuales reductores, arcillas intercambiadoras iónicas y silicatos complejos presentes en el mineral alimentado.
- El curado debe adoptar dosis calculadas de modo que sean compatibles:
  - \* una máxima ganancia de cinética,
  - \* un mínimo potenciamiento del consumo de ácido y contribución de exceso de ácido a la solución rica, y
  - \* una mínima incorporación de impurezas solubles a las soluciones ricas.
- Debe evitar la formación de capas freáticas e inundaciones localizadas, que se traducen en canalizaciones y deslizamientos o derrumbes del apilamiento y en sólidos suspendidos en el PLS.
- Debe permitir idealmente, el tratamiento conjunto de minerales con mineralogía diversa, incluidas especies de óxidos, de sulfuros y de algunas consideradas como refractarias.
- Debe minimizar las pérdidas por impregnación de soluciones en la pila.
- Debe permitir administrar el comportamiento del fierro e impurezas de modo que:
  - \* Su disolución sea la mínima posible, dentro del rango de recuperación de especies de valor plantadas como objetivo.
  - \* Se mantengan en solución las cantidades y proporciones "férrico-ferroso" para producir las interacciones deseadas, en cuanto a: la regeneración de ácido, a la creación de condiciones oxidantes y a la co-precipitación de impurezas.

- \* Se evite la formación de precipitados férricos coloidales que fomenten bloqueos y canalizaciones al paso de las soluciones.
- \* Se permita anular el efecto de esos precipitados cuando ellos se formen inevitablemente.
- \* Se mantengan en solución los contenidos necesarios para el comportamiento adecuado de bacterias de distintos tipos en la lixiviación de sulfuros.

#### OBJETIVOS DESEABLES POR SX

- El PLS debe cumplir consistentemente con las condiciones de concentración de cobre y de ácido, para que la planta SX se mantenga en su eficiencia máxima de diseño.
- Debe generar una solución rica limpia, sin sólidos suspendidos, coloides, fierro, cloro, manganeso y sulfatos totales, para minimizar peligros de borras y de traspasos de impurezas al electrolito que demanden descartes excesivos y los consiguientes consumos de agua tratada, aditivos y energía en calentamiento.

Tales objetivos de la lixiviación son factibles de obtener, dado que:

- La recuperación metalúrgica es una “meta objetivo” y no necesariamente un resultado o variable dependiente del mineral, al menos en un rango que generalmente es mayor de lo que se piensa.
- Esta “meta objetivo” de recuperación queda limitada por factores económicos asociados a las condiciones de procesos y a las de operación de la lixiviación.
- Diferentes condiciones de procesos y de operación proceden a cinéticas y a costos de lixiviación diferentes.
- En conclusión, las principales variables independientes resultan ser las condiciones de procesos y las de operación que incluya la “técnica de lixiviación”, por lo que se debe descubrir las condiciones que sean más convenientes para lograr la recuperación objetivo.

Tales “técnicas de lixiviación” requieren varias definiciones previas e independientes antes de establecer las estrategias del enfoque:

- \* La forma de resolver la ecuación: *"aporte de ácido = consumo de ácido"*.
- \* La forma de aportar la “Razón de Riego” necesaria.
- \* La definición de la base de la técnica, sea ella química o rédox.
- \* Si la base es rédox, la definición de si las oxidaciones serán bacterianas, atmosféricas o químicas.

De la definición de esas estrategias previas resultan como objetivos y parámetros de lixiviación. De ellas las principales resultan ser:

- La Recuperación Metalúrgica** : muy incidente en los costos del proceso.
- El Consumo De Ácido** : muy incidente en los costos del proceso.
- La Cinética** : incidente en la configuración de las instalaciones y por lo tanto en las inversiones.
- Las Impurezas De Las Soluciones** : Incidentes en las configuraciones, inversiones y costos de los procesos de SX que siguen a la lixiviación para procesar sus soluciones ricas.

Los parámetros dependientes de las estrategias y otros provenientes de decisiones propias que generalmente se refieren a temas de: *Manejo de Minerales* (Chancado, aglomeración, carga y configuración de pilas), *Manejo de Soluciones* (Configuración de riego, secuencia de aplicación de soluciones, tasas y medios de riego, formas de recolección de soluciones, consumo de aguas) y *Aspectos de Operación* (Arrastres de finos, inundaciones y canalizaciones de solución, derrumbes de pilas, inyección de aire y otros), los que deben combinarse para resolver simultáneamente los problemas operacionales de la lixiviación; que incidan en los costos, en los diseños y en las inversiones.

A continuación proporcionaremos una descripción de los mecanismos que permiten lograr los objetivos planteados, en el rango en que sea posible.

### 3. REVISION DEL EQUILIBRIO DEL ACIDO

Partiendo de la base de considerar al ácido sulfúrico como una de las fuerzas impulsoras más importantes de la lixiviación, podemos comenzar el análisis con la simple ecuación de equilibrio:

<b>APOORTE DE ACIDO</b>	=	<b>CONSUMO + SOBRANTE DE ACIDO</b>
- En el Curado	-	Por cobre y por ganga.
- En el Riego	-	El sobrante aparece sólo tras satisfacer los consumos
- Por Generación Interna		

**El problema de esta igualdad es que el consumo de ácido de la ganga depende de su disponibilidad (al menos en un rango); de modo que los términos de la ecuación son mutuamente dependientes.**

Consecuentemente, se debe incorporar una referencia de la relación entre el ambiente generado por el aporte de ácido y la recuperación metalúrgica, para establecerla como condición adicional del escenario en que debe verificarse la ecuación, para que sus resultados tengan sentido y sean aplicables a los diseños.

**Si: APOORTE DE ACIDO < CONSUMO DE ACIDO**

*Entonces : Se afecta la recuperación metalúrgica*

**Si: APOORTE DE ACIDO > CONSUMO DE ACIDO**

*Entonces : - Casi se logra la recuperación metalúrgica máxima.*

- Se obtiene una buena cinética.
- Aumenta el "consumo neto" de ácido.
- Se incorporan impurezas al sistema.
- Puede existir un sobrante de ácido.

**Si: APOORTE DE ACIDO = CONSUMO DE ACIDO**

***Y además: EN UNA CONDICIÓN DE BAJA CONCENTRACION DE ACIDO EN LA SOLUCION RICA Y EN UN AMBIENTE QUE FOMENTE REACCIONES REDOX.***

*Entonces se obtienen:*

***Efectos Positivos:***

- \* Se activan las oxidaciones del fierro y del cobre
- \* Se inactivan interferentes: se oxidan los reductores y se pasivan las arcillas con capacidad de intercambio iónico.
- \* Se logra la recuperación metalúrgica máxima, al contar con Fe<sup>+3</sup> como colaborador para lixiviar sulfuros y el Cu<sup>0</sup> que precipitaron los reductores.
- \* Disminuye el consumo neto de ácido.
- \* Las soluciones se limpian y se incorporan menos impurezas al sistema.

***Efectos Negativos:***

- \* Se afecta la cinética.

Dado que las soluciones de lixiviación (PLS) se procesan por SX y que esta tecnología es favorecida al procesar un PLS con pH en el orden de 2, se recomienda adoptar ese valor como referencia en los drenajes de las pruebas de columnas destinadas a resolver la relación entre aportes y consumos de ácido al lixiviar el cobre de los minerales. Este es el enfoque que se asume en las pruebas de "Columnas Iso-pH" que se describirán más adelante.

#### 4. REVISION DE LA “RAZON DE LIXIVIACION”

##### 4.1 EL CONCEPTO Y SUS APLICACIONES

De acuerdo con la experiencia y observaciones, la ecuación base de la lixiviación está condicionada cinéticamente por la “Razón de Riego” necesaria para suministrar las soluciones que activan la físico-química del sistema, ya que está asociada a las condiciones adicionales necesarias para resolver:

- La cantidad y el lugar para aportar el ácido necesario para que las reacciones que provoca obtengan simultáneamente concentraciones de cobre, ácido e impurezas pre-establecidas como objetivos para la solución rica,
- Las interacciones detectadas en estudios metalúrgicos y por experiencia operacional, entre las cinéticas del consumo de ácido, de la recuperación metalúrgica, de la disolución de impurezas y,
- La definición previa de una recuperación objetivo factible de obtener bajo criterios económicos, en las condiciones estudiadas en las pruebas metalúrgicas y en la experiencia operacional.

El concepto de la Razón de Riego se expresa en la ecuación:

$$\text{“Razón de Riego”} = \frac{\text{Volumen de Solución Regada (m}_{\text{sol}}^{\text{3}}\text{)}}{\text{Mineral (Ton)}}$$

En la que cual, el **Volumen de Solución Regada (m<sub>sol</sub><sup>3</sup>)** es la cantidad total de riego que permite lograr el % de Recuperación de cobre a la cual se asocia, medido en pruebas metalúrgicas de columna.

Al expresar la **Altura de apilamiento de Mineral** en (m<sub>min</sub><sup>3</sup> m<sub>pila</sub><sup>2</sup>) y combinarla con su **Peso Específico Aparente** en (Ton/m<sub>min</sub><sup>3</sup>) se obtiene la masa de mineral por superficie:

$$\text{Mineral/m}^{\text{2}} = \text{Alt. (m}_{\text{min}}^{\text{3}}/\text{m}_{\text{pila}}^{\text{2}}) * \text{P. Esp. Ap. (Ton/m}_{\text{min}}^{\text{3}})$$

Por su parte, el **Volumen de Solución Regada (m<sub>sol</sub><sup>3</sup>)** al mineral apilado en cada m<sub>pila</sub><sup>2</sup>, resulta de regar a una **“Tasa de Riego” (m<sub>sol</sub><sup>3</sup>/m<sub>pila</sub><sup>2</sup>/h)** durante el **“Ciclo de Lixiviación en (h)”**.

$$\text{Volumen de Solución Regada (m}_{\text{sol}}^{\text{3}}/\text{m}_{\text{pila}}^{\text{2}}) = \text{“Tasa Riego” (m}_{\text{sol}}^{\text{3}}/\text{m}_{\text{pila}}^{\text{2}}/\text{h)} * \text{Ciclo (h)}$$

A partir de la combinación entre ambas expresiones se calcula la duración del ciclo de lixiviación en el contexto de alturas diferentes de las ensayadas:

$$\text{Ciclo (h)} = \frac{\text{“Razón Riego”}(m_{\text{sol}}^3/\text{Ton}) * \text{Altura}(m_{\text{min}}^3/m_{\text{pila}}^2) * P. \text{ Esp. Ap.}(\text{Ton}/m_{\text{min}}^3)}{\text{“T. Riego”}(m_{\text{sol}}^3/m_{\text{pila}}^2/h)}$$

En el caso de aplicar secuencias de “riegos y reposos” se debe usar la tasa de riego promedio ponderado o corregir la tasa instantánea con el % de período de riego en cada sub-ciclo de aplicación.

Considerando que el aporte de cobre soluble del mineral apilado en cada  $m_{\text{pila}}^2$  está definida por su % de **Ley de cobre** y % de **Recuperación**:

$$\text{Cu Rec.}(\text{KgCu}_{\text{Rec.}}/m_{\text{pila}}^2) = \text{Mineral}(\text{Ton}/m_{\text{pila}}^2) * 10 * \text{Ley}(\text{KgCu}/\text{Ton}) * (\% \text{ Rec.} / 100)(\text{KgCu}_{\text{Rec.}}/\text{KgCu})$$

A partir de las expresiones es posible calcular la concentración del PLS que se obtendría de un riego de toda la pila con refino:

$$\text{Conc. Cu}_{\text{PLS}}(\text{Kg}/m_{\text{sol}}^3) = \frac{\text{Cu Rec.}(\text{KgCu}_{\text{Rec.}}/m_{\text{pila}}^2)}{\text{“Razón Riego”}(m_{\text{sol}}^3//\text{Ton})} + \text{Conc. Cu}_{\text{Ref.}}(\text{Kg}/m_{\text{sol}}^3)$$

Que más desarrollada se expresa como su equivalente:

$$\text{C. Cu}_{\text{PLS}}(\text{Kg}/m_{\text{sol}}^3) = \frac{\text{Min.}(\text{Ton}/m_{\text{pila}}^2) * 10 * \text{Ley}(\text{KgCu}/\text{Ton}) * (\% \text{ Rec.})(\text{KgCu}_{\text{Rec.}}/\text{KgCu})}{100 * \text{“R. Riego”}(m_{\text{sol}}^3//\text{Ton})} + \text{C. Cu}_{\text{Ref.}}(\text{Kg}/m_{\text{sol}}^3)$$

De las ecuaciones se deduce que:

- La duración del ciclo de lixiviación es directamente proporcional a la altura de apilamiento.
- La concentración del PLS queda dependiente de la altura y de la combinación entre la **“Razón de Riego”**, la **“ley de cobre”** y el **“% de Recuperación”**, cuando el mineral apilado se riega sólo con refino.

Un concepto derivado de la razón de riego es la **“Razón de Concentración”**. Esta es la cantidad de solución de riego externa (refino) que debiera disolver el cobre recuperable para lograr la concentración objetivo o deseada:

$$\text{“Razón Conc.”}(\text{m}_{\text{sol}}^3/\text{Ton}) = \frac{\text{Mineral}(\text{Ton}/\text{m}_{\text{pila}}^2) * 10 * \text{Ley}(\text{KgCu}/\text{Ton}) * (\% \text{ Rec.}/100)(\text{KgCu}_{\text{Rec.}}/\text{KgCu})}{\text{Conc. Deseada Cu}_{\text{PLS}} (\text{Kg}/\text{m}_{\text{sol}}^3)}$$

Para cumplir con la demanda de **“Razón de Riego”** del mineral para sus mecanismos de difusión es obligatorio re-circular al riego la diferencia en la nueva **“Razón de Recirculación”**. Así:

$$\text{“Razón Recirculación”}(\text{m}_{\text{sol}}^3/\text{Ton}) = \text{“Razón Riego”}(\text{m}_{\text{sol}}^3/\text{Ton}) - \text{“Razón Conc.”}(\text{m}_{\text{sol}}^3/\text{Ton})$$

Dado que la pila se organiza en módulos, su riego diferenciado condiciona que la **Concentración Deseada en PLS**, debe elegirse en forma conciliada con esa organización, en un rango que en general sólo es cercano al deseado.

#### 4.2 RELACIONES ENTRE LA “RAZÓN DE RIEGO”, LA “TASA DE RIEGO”, EL TAMAÑO DE PARTÍCULAS Y LA CALIDAD DE LAS SOLUCIONES

El concepto de la **“Razón de Riego”** se relaciona con la cantidad de solución que se requiere para que las difusiones en la pila y en las partículas satisfagan las necesidades de aportar los reactivos requeridos por los mecanismos químicos de la lixiviación y las de extraer sus productos.

Como consecuencia de esos mecanismos disfusionales en la pila y en las partículas:

- La razón de riego es directamente proporcional al tamaño de las partículas.
- La razón de riego es inversamente proporcional a la percolabilidad del lecho mineral y a la porosidad de las partículas que lo componen ya que una difusión fácil disminuye la Razón y una difícil la aumenta.
- La razón de riego es directamente proporcional a la viscosidad y densidad de las soluciones, a causa de su carga iónica.
- La razón de riego es directamente proporcional a la “Tasa de Riego” por lo que altas Tasas se traducen en altas Razones y vice versa.
- En consecuencia: altas tasas aumentan la cinética, pero tienden a aumentar la Razón, el consumo de energía en bombeo y la dilución de las soluciones ricas. Bajas tasas implican



una Razón de Riego y un gasto de energía menor, soluciones ricas más concentradas, pero en un tiempo mayor.

- La causa de la interdependencia está en el espesor de las capas líquidas que circulan por la superficie de las partículas el cual afecta el equilibrio entra la fracción que ingresa con reactivos y la que drena de ellas con productos,

Una buena solución es establecer un "equilibrio dinámico" mediante pulsos de riego a relativamente alta tasa seguidos de períodos de reposo, de modo que el riego aporte rápidamente reactivos a partículas drenadas y luego los productos drenen sin interferencias. Este procedimiento conduce a las mínimas Razones de Riego, consumos de energía y más altas concentraciones en un tiempo que debiera ser más largo, pero que se compensa por la menor Razón requerida. Más adelante se revisa este procedimiento con más detalle.

#### **4.3 INFLUENCIA DE LAS “RAZÓN DE RIEGO, DE CONCENTRACIÓN Y DE RECIRCULACIÓN” EN LAS CARACTERÍSTICAS DE LA SOLUCIÓN RICA**

Las “**Razones de riego, de Concentración y de Recirculación**” suministran las soluciones de riego que activan la físico-química del sistema y que están asociadas a las condiciones que determinan:

- El ácido necesario para obtener las concentraciones de cobre, ácido e impurezas establecidas como objetivo en el PLS,
- Las interacciones entre las cinéticas de la recuperación del cobre, del consumo de ácido y de disolución de impurezas y,
- La definición de un objetivo factible de recuperación bajo criterios económicos, en condiciones estudiadas en pruebas metalúrgicas y en la operación.

Las “**Razones**” activan la físico química de la lixiviación; permiten definir estrategias de riego en contracorriente y con recirculaciones que permiten ajustar a las concentraciones de las especies en el PLS dentro de rangos convenientes, con el apoyo de una configuración de pilas separadas y una cantidad de módulos de tamaños calculados.

**La concentración del cobre del PLS:** Queda condicionada por la recuperación, por la cinética y recirculaciones; es independiente de la altura de pilas y de la tasa de riego, provisto que los otros factores están ajustados; la duración del ciclo queda como variable dependiente de todas ellas.

**La concentración del ácido del PLS:** Queda condicionada por el aporte controlado de ácido desde diversas fuentes y por el consumo del mineral en la etapa de generación de PLS, por riego con recirculación y con refinado hasta alcanzar la “razón de lixiviación”.

**Las concentraciones de impurezas del PLS:** Quedan condicionadas por el aporte controlado de ácido, y sus respectivas cinéticas de disolución, por los ambientes redox y por el manejo del hierro para formar precipitados de jarositas y de otros complejos que los remueven de la operación del sistema para que permanezcan inertes en los ripios.

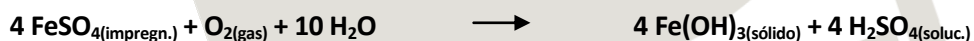
## 5. EL POTENCIAL REDOX

El potencial Redox tiene una importancia ampliamente reconocida en la lixiviación de sulfuros, pero también controla los reductores del mineral y los estados de oxidación del hierro en la lixiviación de óxidos y así define los compuestos secundarios que ellos forman.

Por ejemplo, en un ambiente reductor, el hierro estará al estado ferroso y no formará precipitados coloidales de hidróxidos, ni de jarositas y por lo tanto no interferirá en la porosidad del lecho. Pero si el ambiente es oxidante, aumentará el consumo de ácido para mantener los iones férricos en solución, pero aparece el peligro de la formación de jarositas, que son capaces de afectar la porosidad del lecho mineral y también la difusión al interior de las propias partículas.

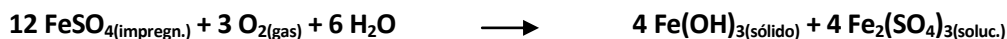
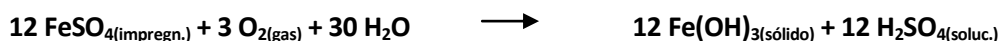
### 5.1 LA ACTIVACIÓN DEL PROCESO

#### 1ª SERIE DE REACCIONES:



- Las especies de hierro se disuelven, principalmente al estado  $\text{Fe}^{+2}$ .
- El  $\text{Fe}^{+2}$  queda impregnado en la roca al detener el riego durante los reposos
- Luego se oxida a  $\text{Fe}^{+3}$  en contacto con el oxígeno gaseoso o por acción bacteriana y
- El  $\text{Fe}^{+3}$  queda en un estado hidrolizado, simple o complejo.
- El  $\text{Fe}^{+3}$  hidrolizado se re-disuelve al aportar más ácido en el riego siguiente y consume adicionalmente 0,86 Kg de ácido fresco/Kg de ión ferroso oxidado.
- El  $\text{Fe}^{+3}$  en las soluciones participa eventualmente en reacciones redox y se reduce y retorna al estado ferroso  $\text{Fe}^{+2}$ .

**2ª SERIE DE REACCIONES:**



que se combina con:



- Se repiten las oxidaciones consecuentes de la 1a Serie de reacciones, ó
- Participa el hierro férrico que hidrolizó antes, ya re-disuelto según las reacciones.
- Al subir el pH (por el consumo de ácido del mineral; esto es, en un ambiente de baja acidez) y en presencia de otros iones, se forman jarositas.
- Así se pierden desde las soluciones: hierro (férrico), sulfatos (1,15 Kg/KgFe) y otros iones presentes (p.ej.: sodio = 0,13 Kg/KgFe) por precipitación virtualmente permanente y se regenera 0,86 Kg de ácido sulfúrico/Kg de hierro precipitado.
- En consecuencia, las jarositas contribuyen a la eliminación de impurezas desde las soluciones y a la devolución de parte del ácido consumido.
- Existen diversos tipos de jarositas que incorporan otros elementos (se ha controlado Mg, Al y otros) que son también co-abatidos.
- Las jarositas sólo se re-disuelven en ambientes mucho más ácidos que en los que se formaron.

Entonces, el proceso de lixiviación, su cinética, recuperación metalúrgica, consumos de ácido y las tasas de abatimientos quedan controladas por:

- \* La concentración de ácido en las soluciones, que determinan la cinética y las tasas de disolución de hierro según los ambientes de pH al interior de la pila y de modo que terminan por traducirse en un menor contenido de ácido libre en la solución rica y consecuentemente en el refinó.

- \* El ambiente de potencial Eh en la pila, que define las formas de oxidación del ión ferroso; este ambiente puede controlarse por oxidación atmosférica o con participación de bacterias, en un ambiente que les sea compatible y hasta por reactivos químicos externos.
- \* En consecuencia, es conveniente dilucidar la relación entre la acidez que fomenta la cinética de la recuperación y la que, al mismo tiempo, disuelve o abate las impurezas, a tasas más allá de lo prudente, en la 1ª etapa de lixiviación del mineral fresco alimentado a la pila cuando su consumo de ácido es aún elevado y puede elevar el pH.
- \* Es también conveniente establecer la relación entre el pH y el contenido de hierro de las soluciones, ya que este ión es el responsable del ambiente de potencial rédox (Eh) necesario para las oxidaciones y para el abatimiento de impurezas.
- \* Sobre la base del comportamiento experimental del hierro, se consideran adecuadas tasas máximas de abatimiento del orden de 2 KgFe/TM, como jarositas dispersas, para evitar bloqueos localizados de la percolación.

## **6. TÉCNICAS OPERACIONALES**

### **6.1 EL RIEGO PULSANTE O INTERMITENTE**

Una técnica asociada a los mecanismos antes indicados es el uso de "pulsos de riego y reposo", según el cual, el ciclo de lixiviación ocurrirá en una sucesión de cortos períodos de riego y de reposo, generalmente de igual duración.

En el período de riego se aportan las soluciones con los reactivos a la pila y a las partículas. El reposo permite el drenaje y estruje completo de las soluciones, de modo que las partículas permanezcan húmedas en las soluciones de riego, pero sin películas de líquido que las aislen del aire que se introducirá a la camada mineral.

Esta metodología de aplicación de soluciones de riego optimiza la lixiviación en base a los siguientes efectos:

#### **i. METALÚRGICOS:**

- \* La "razón de lixiviación" necesaria para lograr la recuperación objetivo disminuye, dado que las drenadas partículas de mineral admiten con mayor facilidad y eficiencia los reactivos de cada nueva solución de riego aplicada. De la misma forma, las partículas vacían sus productos sin la interferencia de de capas líquidas en su superficie durante el estruje en cada etapa de reposo.

- \* Esta optimización hace innecesario el recurso de presionar sobre las tasas de riego, para mejorar cinéticas y recuperaciones y de paso evita el deterioro de la concentración de cobre de las soluciones ricas.

## ii. FÍSICO-QUÍMICOS:

- \* Las múltiples exposiciones de las partículas al aire en los reposos sucesivos, permite oxidar los reductores presentes y las partículas de cobre metálico precipitadas por ellos, también altera las arcillas intercambiadoras iónicas e inhibe simultáneamente sus efectos y la formación de silicatos amorfos y coloidales durante el proceso.
- \* En las lixiviaciones bacteriales, proporciona el oxígeno para activar el desempeño de los organismos.
- \* El tiempo de exposición de las partículas al aire permite la oxidación de los iones ferrosos presentes en la solución que moja las partículas, para que precipiten fácilmente por hidrólisis, pero en forma altamente diseminada en el mínimo e inmóvil líquido impregnado, por lo que se evitan las micelas coloidales de hidróxidos capaces de provocar taponamientos y canalizaciones en la pila.
- \* Dependiendo de la posibilidad de asociación con otros iones, parte del férrico hidrolizado se disolverá al disponer de algo de ácido fresco al reponer el riego y otra parte del hierro quedará precipitado al estado de jarositas, en forma diseminada y virtualmente permanente.
- \* Los iones férricos hidrolizados y re-disueltos, se incorporan a la lixiviación, apoyan la recuperación de cobre y retornan al estado ferroso, para luego repetir el ciclo en el pulso de riego siguiente, en función de la disponibilidad de ácido en las nuevas soluciones de riego.
- \* En el estado de precipitación permanente de los iones férricos al estado de las amorfas jarositas, se incluyen por diversos mecanismos parte de los cationes de impurezas y también aniones; entre los que se cuentan cloruros y sulfatos.
- \* Dependiendo del ambiente específico de pH y Eh en torno al ión ferroso al momento de oxidarse a férrico y formar jarositas durante el reposo, se produce una regeneración parcial del ácido asociado como sulfato a los cationes precipitados, que en el riego siguiente se incorpora a la solución como agente activo, restándose del consumo externo del reactivo.

## iii. HIDRÁULICOS:

- \* Se disminuyen las canalizaciones, dado que en el reposo de cada pulso se borran las vías de paso del riego anterior, lo que obliga a formar nuevas rutas de paso en el siguiente ciclo de riego.

- \* Disminuyen los peligros de inundación y derrumbes de pilas, dado que se permite el drenaje del lecho de mineral antes de su saturación.
- \* En los reposos se deshidratan los voluminosos geles de jarositas coloidales y cambian al más des-hidratado estado de partículas “sol”, de menor tamaño, con lo que se mantiene la porosidad del lecho de mineral.

## 6.2 LA SECUENCIAS DE APLICACIÓN DE LAS SOLUCIONES.

Las formas de aplicación de las soluciones dependen de la mineralogía del mineral –principalmente de la eventual presencia de interferentes- y de la concentración deseada de cobre, ácido e impurezas en la solución rica:

- \* La presencia de arcillas con propiedades de intercambio iónico en el mineral aconseja que las primeras aplicaciones de soluciones contengan iones de poco valor; concretamente sugerimos curados con refino, para que los centros activos capturen inmediatamente los iones de impurezas y se encuentren ocupados cuando existan las soluciones con cobre lixiviado. (preg-robbin).
- \* Se sugiere iniciar el riego del mineral fresco con refino, para garantizar la acidulación interna de las partículas y evitar la precipitación interna de jarositas al producir las primeras soluciones ricas.
- \* Si hay reductores presentes en el mineral, se aconseja destruirlos e inhibir su capacidad para precipitar cobre al inicio, mediante la generación de ambientes oxidantes en la pila. Al respecto, se sugieren como alternativas:
  - i. Curados con refino, seguidos de reposo más prolongado antes de regar, para permitir que el aire oxide su  $Fe^{+2}$  a  $Fe^{+3}$ , para que éste contribuya al mismo rol. Durante el primer reposo prolongado antes de regar, se aconsejan humectaciones sucesivas que contribuyan con más iones al mismo proceso.
  - ii. Curados con solución intermedia, ya que normalmente es la que posee el mayor Eh.
- \* Altos contenidos de óxidos en el mineral también aconsejan iniciar los riegos de mineral fresco con refino para acelerar la etapa química, hasta la aparición de ácido en la solución rica. Ello proporciona ventajas cinéticas al proceso dada la mayor disponibilidad de ácido de esas soluciones. El saldo del refino se destina al lavado de las pilas y a generar solución intermedia.
- \* Bajos contenidos de óxidos en minerales mixtos aconsejan iniciar los riegos de mineral fresco con solución intermedia. El refino se destina al lavado de las pilas y a generar solución intermedia, parte de la cual avanza a la generación de solución rica, mientras otra parte

re-circula sobre si misma para alcanzar la pre-concentración de cobre necesaria para alcanzar la concentración deseada de cobre en la solución rica.

- \* La concentración de cobre en la solución rica puede ser definida a voluntad y se traduce en una "razón de concentración" (ó m<sup>3</sup> de PLS drenada por tonelada de mineral alimentado). Esta se compara con la "razón de lixiviación" (ó m<sup>3</sup> de solución por tonelada de mineral alimentado) necesaria para lograr la recuperación objetivo. La diferencia entre ambas representa la recirculación necesaria para lograr la concentración objetivo en el PLS.
- \* Las formas de recirculación experimentadas corresponden a:
  - i. La ya mencionada recirculación de solución intermedia contra sí misma, típica de minerales de cinética más bien lenta. Esta solución intermedia puede controlarse para lograr un ambiente oxidante (por bacterias u oxidación atmosférica) en una zona amplia, para lixiviar sulfuros.
  - ii. La recirculación de solución rica (con el ácido remanente o re-acidulada directamente), para lixiviar de óxidos y las más dóciles calcosinas.
  - iii. En todos los casos deben usarse las relaciones cinéticas y físico químicas estudiadas en laboratorio previamente.
  - iv. Es conveniente sobredimensionar las instalaciones de recirculación para ajustar la lixiviación de minerales de menor cinética, sin afectar las concentraciones objetivos de la solución rica.

La altura de la pila queda independiente de la concentración deseada de la solución rica, dado que en el contexto de las recirculaciones el ajuste de concentración se obtiene mediante del arreglo de las razones de riego, de concentración y de recirculación que se calcularon. Con el enfoque de las recirculaciones, la definición de la altura de apilamiento queda dependiente de aspectos prácticos tales como: disponibilidad de área, relación del costo de apilamiento con la altura o en superficie, la cinética y costos de descarga (si proceden, en una pila renovable).

- \* Las tasas de riego se relacionan con las formas de lograr las "razones de lixiviación", que resultan más incidentes en la cinética y en la recuperación:
  - i. Las soluciones limpias, los minerales competentes (que no se degraden) y las granulometrías mayores resultan aptas para tasas de riego elevadas.
  - ii. Consideraciones operacionales relacionadas con apozamientos, canalizaciones y derrumbes de pilas resultan más incidentes e importantes que la cinética asociada a tasas elevadas, para procurar disminuir los tiempos de tratamiento.



- \* Debe recordarse que una lixiviación rápida no es un objetivo económico en sí mismo (en general más bien se contrapone a ello). Si lo son: una recuperación elevada y un bajo consumo de ácido.

### 6.3 REVISIÓN DE LA DOSIS DE ÁCIDO Y TÉCNICAS DE APLICACIÓN DEL CURADO.

Convencionalmente, la dosis de ácido en el curado se estudia en pruebas cuyos resultados comparan la recuperación inmediata de cobre, al lavar el mineral con agua a continuación, con cada dosis aplicada. Las pruebas definen al mismo tiempo los efectos sobre la aglomeración del mineral para aumentar su "porosidad" del lecho por aglomeración de finos contra gruesos y fracturas internas de las partículas más grandes. Muy raras veces se estudian los efectos de las alteraciones causadas por las dosis de ácido sobre las lixivitaciones posteriores al lavado.

Usualmente de ese estudio resultan dosis claramente relacionadas con el contenido de calizas en el mineral (que se aceptan como un consumo constante) y que son ligeramente inferiores al consumo de ácido neto (o de la ganga) del mineral y se adoptan sin más análisis para el proceso industrial.

Este simple metodología de análisis puede considerar o descartar algunos puntos importantes:

- La respuesta del curado es diferente si la humectación se hace sólo con agua industrial (sea dulce o salada) o con refino u otra solución recirculada que contenga una carga iónica de iones.
- Hay casos en que la respuesta de recuperación y de consumo de ácido del mineral también es sensible al tiempo de reposo del material curado antes del lavado.
- La máxima recuperación del lavado a veces va asociada a un sobrante de ácido detectable en la solución resultante.
- Dado que en la lixiviación real el lavado se efectúa por riego con soluciones ácidas, en el caso anterior resulta un PLS aún más ácido, lo que no es deseable.
- La cinética de reacción de las calizas es bastante menor que la de las especies oxidadas y frecuentemente resulta en una conclusión engañosa del consumo de ácido durante el curado.

Sin embargo el problema principal está en que las fuentes de ácido a la lixiviación ocurren por aportes en el curado, en los riegos con refino y con alguna recirculación (cuyas concentraciones de ácido sólo es posible aumentar pero no neutralizar) y por generación interna (que cuando ocurre es difícilmente controlable). Además, la planta SX-EW generará descartes que por

varias rutas de proceso terminan en el refinado y le aportan un ácido adicional que tampoco es posible ajustar y que además nunca es considerado en los balances de las pruebas de curado y de lixiviación. De todo lo anterior resulta que existen varios casos en los que el único ácido externo que se puede ajustar para satisfacer el balance total de su consumo es la dosis de curado y en este caso la dosis es menor a la dosis estudiada y resulta como diferencia entre el consumo y la suma de los aportes no regulables por descartes y en los riegos, cuando estos no requieren adición externa de ácido.

Obviamente existirá una pérdida de cinética asociada a la menor dosis, pero el PLS tendrá una acidez menor y más conveniente para la planta SX.

Existen situaciones para las cuales es difícil justificar la necesidad de tambores aglomeradores, principalmente ellas son:

- \* El mineral es poco consumidor de ácido y la dosis de curado es muy baja, por lo que también el efecto de aglomeración es muy limitado.
- \* El procesamiento de mineral ROM, cuyo tamaño de partículas les hace inmanejables mecánicamente en un tambor.

Para ellos resulta aplicable un "curado por impregnación", consistente en un riego controlado con soluciones más aciduladas con la dosis, según una secuencia destinada a favorecer la impregnación de las soluciones en el mineral y a evitar su paso por la camada. Una recomendación para minerales de baja humedad natural es aplicar inicialmente sólo el 40% de la solución de curado, reposar para permitir las difusiones a las partículas y luego 30%, el 20% y terminar con el 10% intercalando reposos entre ellos. Posteriormente se continúa con la aplicación de las soluciones de riego.

#### **6.4 REVISIÓN DE LA CONVENIENCIA DE LAVAR EL MINERAL.**

El ripio lixiviado siempre retiene soluciones del último riego con refinado como impregnación y ello representa una purga de las impurezas disueltas en él.

Sin embargo, también contiene:

- Cobre : El contenido en la impregnación representa hasta el 1% de la recuperación y es conveniente recuperarlo; habitualmente esto se procura evitar aumentando la eficiencia de extracción SX para disminuir su concentración en el refinado, pero con una costosa mayor concentración de reactivo en la planta SX.
- Acido: Cuyo valor económico es menor, pero que representa un pasivo medioambiental

en caso que la autoridad opine que las lluvias causarían peligros de drenajes contaminantes fuera de la pila.

Paralelamente, las pérdidas de agua del sistema por impregnación y por evaporación, son repuestas con agua industrial que se agrega al pozo de refino, lo que paralelamente diluye los contenidos que podrían quedar impregnados.

La práctica industrial establece que no es conveniente lavar las pilas con esa reposición de agua, ya que retornarían al sistema las impurezas impregnadas y se aumentarían las sus concentraciones de equilibrio en el PLS.

Sin embargo, si el principal mecanismo de eliminación de impurezas se traslada a su precipitación en las jarositas mediante una lixiviación con acidez controlada, su purga en la impregnación pierde toda relevancia y puede tolerarse su retorno al sistema.

De hecho con el procedimiento:

- \* El agua industrial de lavado con su más alto pH eleva el de las soluciones impregnadas y facilita las precipitaciones de las impurezas por hidrólisis mientras que parte del ácido que estuvo asociado a ellos se integra al drenaje; de hecho se recupera más ácido que el contabilizado como impregnado, al mismo tiempo que se registran en el drenaje menos impurezas que las contabilizadas como impregnadas.
- \* La mayor disponibilidad de ácido de las soluciones en descenso por la camada usualmente mejora la lixiviación y nuevamente se recupera más cobre en el drenaje que el contabilizado como impregnado.
- \* La camada queda lavada a un pH del orden de 4,5 con los cationes confinados como precipitado permanente en los ripios y estabilizados en ese estado. Una lluvia posterior sólo puede arrastrar los impregnados solubles restantes desde el lecho ya lavado y la condición de pasivo ambiental queda relevada.
- \* El refino que no se diluye en el agua de reposición y se usa con una acidez levemente más alta, pero que mejora perceptiblemente su performance.

Las demandas de implementación son delgadas líneas de conducción del agua a las pilas, y conectables a los emisores del riego y el período de aplicación rara vez aumenta el ciclo de lixiviación en más de dos días.

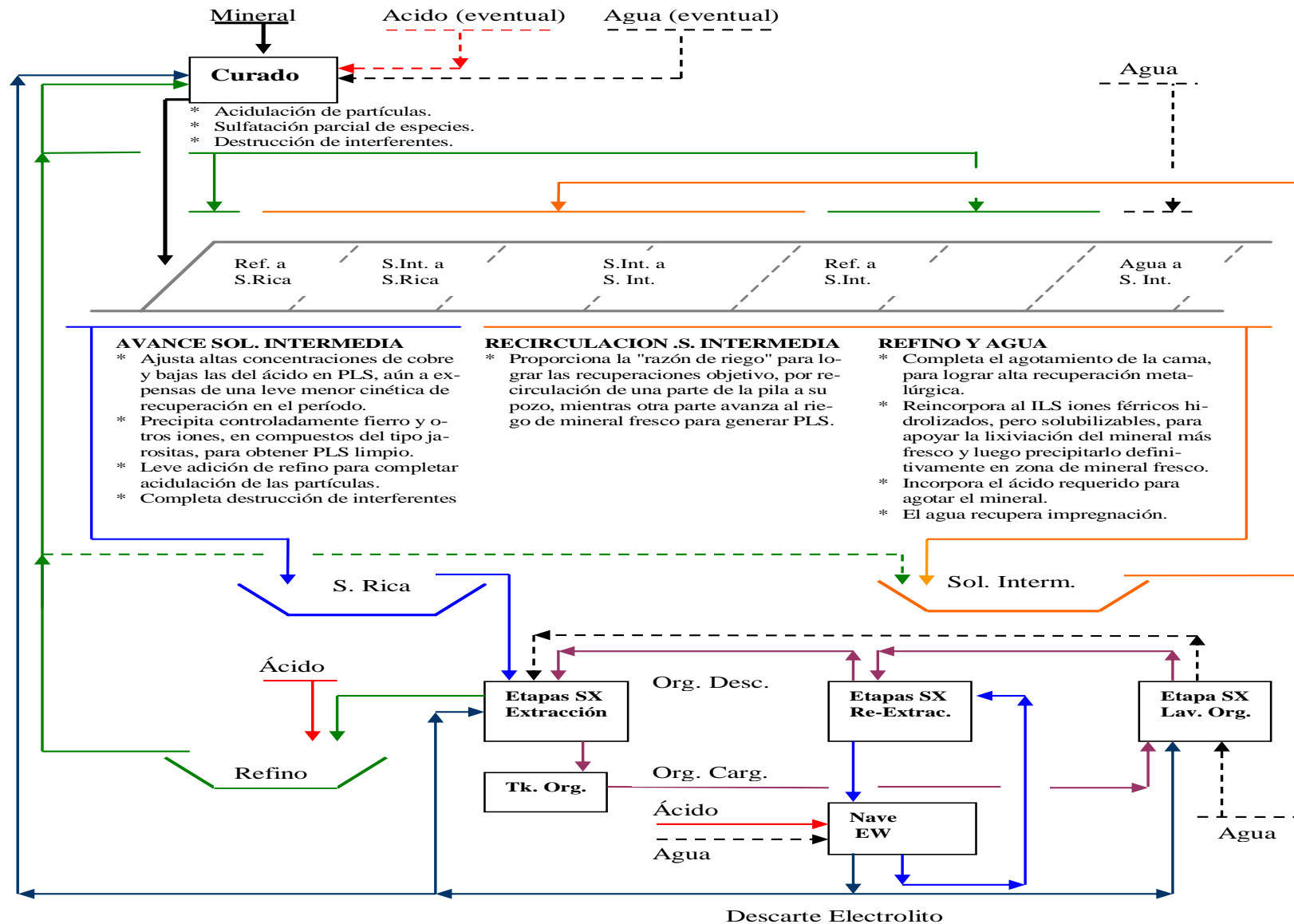
## 6.5 LAS LIXIVIACIONES BACTERIANAS

Los procesos bacterianos coexisten perfectamente con las lixiviaciones químicas.

- \* Las tasas de reproducción y de actividad bacterial son mayores en ambientes sólo húmedos, más bien que en los líquidos. En otras palabras su actividad ocurrirá principalmente durante los reposos de los ciclos de riego, por lo que los riegos corresponden renovaciones de reactivos que causan el drenaje para cosechar los productos de su actividad.
- \* La temperatura es un factor que limita la actividad bacterial y deben procurarse medios para evitar el enfriamiento de pilas y soluciones en los riegos y para favorecer su calentamiento en los reposos.
- \* La oxigenación del lecho es otro factor muy incidente por lo que la altura del apilamiento incide en la forma de efectuarla y en la implementación de los medios para lograrlo:
  - si la camada es baja y los tamaños de partículas son grandes, basta con la succión de aire causada por el drenaje de líquido al iniciar y durante los reposos; esto se ha verificado con alturas de hasta 3m.
  - si las alturas son mayores y la granulometría es pequeña, debe recurrirse a aireación forzada.
- \* Las aireaciones son más efectivas durante los reposos y se requieren tasas de aireación menores.
- \* El contenido de impurezas en las soluciones es un factor determinante, dado que someten a las bacterias a una suerte de "stress osmótico" proporcional. Las bacterias se adaptan a ambientes algo inadecuados, pero sólo dentro de cierto rango que se acepta al asociado a una concentración de sulfatos totales por debajo de 100 g/l.
- \* Algunos cationes y aniones en las soluciones son incompatibles con la actividad bacterial.

## 7. CONFIGURACIONES OPERACIONALES

En las páginas siguientes se ilustran dos enfoques alternativos de configuración de pilas y plantas, para resolver las técnicas de lixiviación propuestas:



**CONFIGURACION DE UN SISTEMA LX-SX-EW BALANCEADO (POR RECIRCULACION DE ILS)**



## 8. PRUEBAS METALÚRGICAS DE LIXIVIACION

Junto con los antecedentes geológicos, las pruebas metalúrgicas son una de las principales fuentes de información para los análisis conceptuales del proyecto. Se formulan por series completas de ensayos para los diferentes tipos de minerales presentes en el yacimiento. Por sí solas, son la principal fuente de datos para tomar las decisiones que conducen a los diseños de procesos de la planta, dado que a través de ensayos sistemáticos definen las estrategias de tratamiento y las recuperaciones metalúrgicas y los consumos asociadas a ellas, que son los temas más incidentes en las posibilidades de éxito económico de un proyecto.

Todos los enfoques de pruebas comparten la determinación de una serie de ensayos básicos, usualmente destinados a determinar entre otros: las leyes de cobre y de algunos otros metales y aniones del mineral, su mineralogía, humedades y propiedades físicas, consumos de ácido, dosis de ácido en curado, distribución granulométrica, “work index” y algunos otros factores de interés para los responsables de ejecutarlas.

Las pruebas mencionadas son seguidas por las de lixiviación en columnas -en laboratorio o en planta piloto- respecto de las cuales el enfoque usual es de “tipo matricial”; esto es, se definen las variables del proceso estimadas como independientes y se las ensaya por separado en varios valores elegidos en un rango razonablemente válido. Consecuentemente y a modo de ejemplo (no necesariamente completo), se ensayan diversas granulometrías máximas, varias tasas de riego, diversas concentraciones de ácido en las soluciones de riego, algunas alturas de apilamiento -y a veces- hasta múltiples técnicas para efectuar algunas operaciones, como por ejemplo: el curado, formas de aplicar el riego, o de oxigenar el lecho.

A continuación y partir de los resultados de los ensayos, se eligen las condiciones de cada serie independiente que, a juicio de los experimentadores, generaron los mejores resultados metalúrgicos y se efectúan nuevas pruebas de columnas para combinarlas a continuación, con lo que se espera obtener las condiciones óptimas del tratamiento.

A pesar de la aparente lógica metodológica del procedimiento, la experiencia indica que la condición optimizada predicha por los enfoques de pruebas matriciales, sólo se cumple en pocas oportunidades y con los minerales más simples del tipo oxidado y de bajo consumo de ácido.

Investigaciones respecto de las causas de los desajustes entre las predicciones y la realidad, muestran que con la metodología matricial se soslayan varios factores importantes a los que sólo recientemente se les comienza a prestar alguna atención y sólo por parte de algunos autores:



- En la práctica, usualmente existen interferentes de la lixiviación constituidos por especies reductoras -que precipitan al cobre como metal- y arcillas intercambiadoras iónicas -que remueven sus iones- desde las soluciones de lixiviación que ya lo contienen para mantenerlo en la misma pila, pero en estados de muy difícil recuperación.
- Las reacciones de óxido reducción tienen una gran importancia en el desarrollo de la lixiviación y sus efectos deben estudiarse, para aprender a controlarlos en beneficio de la economía del proyecto.
- Las “fuerzas motrices” de la lixiviación –es decir: el ácido y las soluciones- no son comprendidas en su verdadero contexto y por lo tanto no son usadas adecuadamente.
- El “como” se usan las fuerzas motrices de la lixiviación tiene una importancia relevante y es difícil descubrir su combinación óptima en un enfoque matricial, dado que se requiere una gran cantidad de pruebas para lograrlo.
- Muchas veces las pruebas de lixiviación no corresponden exactamente a la configuración de los flujos de la planta, por lo que no reproducen factores como las reposiciones de agua (que diluyen los refinados a lixiviación) ni los descartes de electrolito (que ingresan ácido adicional al mismo refino) ni tampoco consideran los equilibrios de los contenidos de impurezas (que afectarán la lixiviación y a la performance de las plantas SX y EW a continuación).

Como consecuencia de esos problemas, se ha desarrollado otra sistemática para las pruebas de columnas que se ilustra en el diagrama de la página siguiente. Esta metodología se basa en las mismas pruebas mineralógicas, químicas y físicas mencionadas al inicio de este punto y además:

- \* Analiza en otro contexto los resultados de las pruebas de curado
- \* Usa pruebas preliminares de columnas para establecer las mutuas interacciones termodinámicas y cinéticas entre las recuperaciones metalúrgicas de cobre e impurezas, los consumos de ácido y las necesidades de solución asociados a ellas.
- \* Define el contexto de la configuración de la planta LX-SX-EW completa para estimar las interacciones que ocurrirán entre todos sus componentes entre si y con la lixiviación.
- \* Permite al Propietario incorporar sus condiciones de calidad para las soluciones ricas y modela la forma viable de cumplir ese objetivo y
- \* Verifica las modelaciones mediante nuevas pruebas de columnas en las condiciones modeladas, que si no alcanzan de inmediato los objetivos sí proporcionan los factores de ajuste para lograrlos, en las pruebas finales en columnas de verificación.

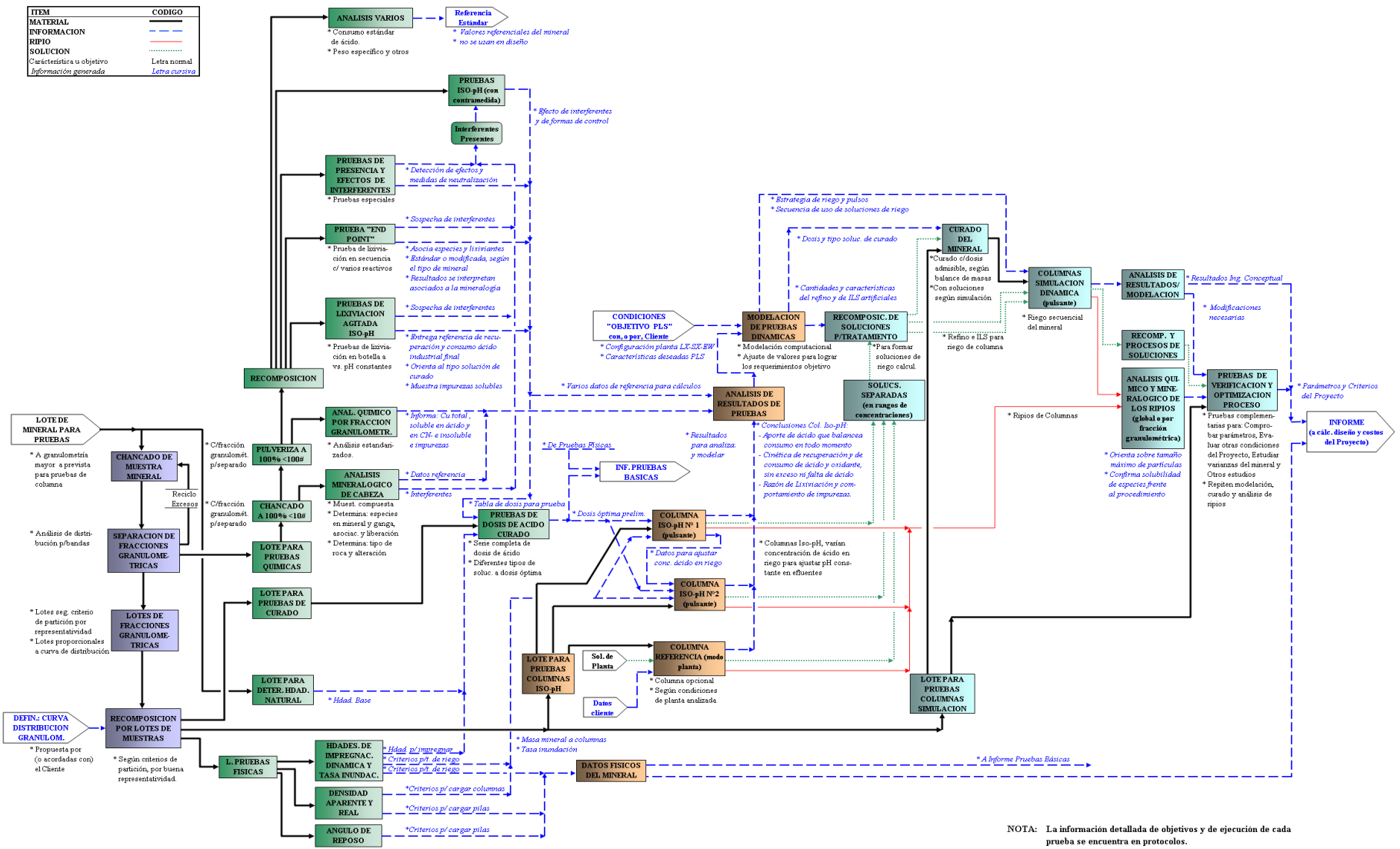
PREPARACION DE MUESTRA

PRUEBAS BASICAS

PRUEBAS COLUMNAS ISO-pH

PRUEBAS DE COLUMNAS DE SIMULACION

ITEM	CODIGO
MATERIAL	---
INFORMACION	---
RIPIO	---
SOLUCION	---
*Característica u objetivo	Letra normal
*Información generada	Letra cursiva



NOTA: La información detallada de objetivos y de ejecución de cada prueba se encuentra en protocolos.

## **9. CONSIDERACIONES PARA DEFINIR LOS PARAMETROS Y LOS CRITERIOS DE LIXIVIACION**

Luego de contar con la información de los factores condicionantes del proyecto, desde la geología hasta las pruebas de lixiviación, y antes de resolver los parámetros propiamente tales, el Propietario puede asumir varias definiciones previas respecto del proyecto; las principales, son:

### **9.1 CONFIGURACIONES GENERALES DE LIXIVIACIÓN:**

Las variables más importantes para diseñar una planta hidrometalúrgica para minerales de cobre son función de los factores de riesgo económico del proyecto y de la estrategia que diseñe el Propietario para enfrentarlos, que dependen de cada caso particular. Como consecuencia, la tarea de las especialidades de ingeniería es instrumental y debe orientarse a resolver los factores cuando corresponda, sea en las etapas de estudios, en la de pruebas metalúrgicas o en las etapas de diseño, para aconsejar al Propietario en las decisiones que le son propias.

En general, las decisiones relativas a las estrategias que adopta el propietario se refieren a los temas siguientes:

- **LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE COBRE**

En estricto rigor, esta decisión se formaliza en la etapa de Análisis de Factibilidad o de Ingeniería Conceptual con ayuda de datos geológicos, mineros, metalúrgicos y de ingeniería de plantas que descubren la “Mejor Opción” desde el punto de vista económico y bajo los criterios establecidos por el Propietario, los que varían de un proyecto a otro, o aún en el mismo proyecto durante los "trade off" del avance del desarrollo.

El punto de vista económico considera las inversiones y costos esperables, los ingresos por ventas y el tipo de financiamiento, los cuales son sensibilizados según los factores de riesgo de la inversión que se detectan.

- **TIPO DE PILAS**

Hoy en día prácticamente todas las pilas son “dinámicas”, con sistemas continuos de carga de mineral, por lo que la disyuntiva se refiere a si son “permanentes”, con el mineral depositado en la pila para no ser removido jamás, o “renovables”, en las que el mineral se retira una vez terminado su ciclo para reutilizar la base.

- \* La decisión es de naturaleza económica y principalmente relacionada con los costos de operación.
- \* En general las inversiones de extracción de mineral desde la mina son inevitables y están bien controlados por los planificadores mineros, que cuentan con equipos estándar de manejo de mineral.
- \* Las inversiones a continuación son moderadas (en términos relativos y más aún si se las compara con las instalaciones de SX y EW) y se concentran más bien en el chancado y en la aglomeración y carga de pilas que en la lixiviación propiamente tal.
- \* Por su parte el costo directo de producción de cobre a partir de un mineral, se concentra principalmente desde la extracción de la mina y hasta la lixiviación del mineral, mientras los costos de las etapas de SX y EW son moderados (en el orden de 9 a 15 centavos por libra) y virtualmente constante en todas las plantas.
- \* En el segmento de la operación, los costos de manejo de materiales son incidentes y deben evitarse, lo que normalmente orienta la estrategia a favor de las pilas permanentes.
- \* Otra estrategia se orienta en favor de:
  - . Sistemas de manejo de materiales de bajo costo operacional. En general ello sólo es posible en el manejo de grandes tonelajes asociados a proyectos muy grandes y de larga duración que permita su amortización.
  - . Justamente en esos proyectos el área cubierta aumenta paulatinamente y los costos de manejo de soluciones suben hasta un nivel inconveniente, lo que orienta la decisión a favor de pilas renovables.
- \* Otra condición usual que define el uso de pilas renovables es la disponibilidad de poco espacio de topografía adecuada.

- **LA ADMINISTRACIÓN DE LAS SOLUCIONES**

La lixiviación de minerales cada vez más complejos conduce actualmente a adoptar configuraciones de lixiviación con recirculación de soluciones intermedias.

- \* La demanda de las recirculaciones (de ILS o de PLS) resulta de conciliar una “Razón de Lixiviación” -que define la cantidad de líquido necesario para lograr la “Recuperación Objetivo”, ó m<sup>3</sup>/TM medidos en pruebas- con una “Razón de Concentración”, que define por cálculo los m<sup>3</sup>/TM adecuados para “envasar” el cobre recuperado en una solución rica de concentración deseada.

- \* La diferencia entre ambas “razones” resulta ser la cantidad de solución que recircula en el sistema.
- \* Cálculos metalúrgicos relativos a la cinética de la recuperación de cobre, del consumo de ácido y del aporte de impurezas, establecen sus concentraciones características, que deben verificarse en pruebas de lixiviación.
- \* Una decisión importante es definir el tipo de solución a recircular al riego y los criterios se basan en la configuración de las canaletas de las pilas y ellos son:
  - . **Si re circula ILS:** Se requieren tres canaletas: 1 sectorizada frente a los módulos (o de la columna de ellos) para recolectar su drenaje y clasificarla, más otras dos para conducir por separado el ILS y el PLS a sus pozos respectivos.
  - . **Si re circula PLS:** Sólo se requiere una canaleta y no sectorizada ya que todo el drenaje se mezcla en la misma para formar el PLS común que se envía a pozos diferentes. La ventaja es que la modulación queda definida sólo por el riego y para los apilamientos en pisos superiores no es necesario desplazar ninguna sectorización.
- **SISTEMA DE RIEGO**

La decisión sobre si el sistema de riego usará aspersores o goteros está condicionada por varios factores, los principales son:

  - \* La disponibilidad de agua: Si ella es escasa orienta a preferir goteros que generan pérdidas moderadas de evaporación, del orden de un tercio de la observada con aspersores del tipo “wobblers”, que son los más usados.
  - \* La necesidad de conservar temperatura de soluciones también orienta a favor del uso de goteros, incluso considerándose instalaciones tapadas con láminas plásticas y líneas enterradas.
  - \* La decisión de regar taludes orienta a favor de goteros o de aspersores especiales.
  - \* Soluciones muy impuras y con peligro de precipitación de sales orientan a favor de aspersores.
  - \* La necesidad de desplazar frecuentemente del sistema de riego sugiere el uso de líneas de tuberías con aspersores.
  - \* Las condiciones ambientales:
    - . Vientos excesivos orientan a favor de goteros.

- . El riego en altura con peligro de congelamiento, orienta preferencias en favor de goteros; en casos extremos, incluso a favor de goteros enterrados en el mineral.

El costo de instalación resultante es relativamente similar para ambos tipos de emisores. Dado que el riego con goteros tiende a generar costras salinas en la pila –muy particularmente con los sistemas de riego pulsante- resulta conveniente combinarlos a ambos, con algunas líneas re-ubicables de aspersores para lavar ocasionalmente las costras superficiales.

## 9.2 LOS PARÁMETROS DE LIXIVIACIÓN PROPIAMENTE TALES

Ya se indicó que en los parámetros se reseñan algunos valores que son datos simplemente medidos o observados, como por ejemplo: las leyes de cobre total y soluble del mineral. Otros son calculados directamente a partir de los datos, por ejemplo: la cantidad total de mineral a lixiviación depende de la producción deseada, y se establece a partir de la ley del mineral y del porcentaje de recuperación, mientras la cantidad de mineral en la pila activa, depende de los factores anteriores y de la duración del ciclo asociada a la tasa de riego y a la altura de apilamiento. Estos tipos de parámetros, relativamente evidentes, no se explican a continuación.

Los parámetros más complejos se establecen luego de contar con la información de las pruebas de lixiviación, que pueden considerarse que aportan las condiciones metalúrgicas del diseño. El análisis de sus resultados para establecer cada uno de los parámetros y criterios procede, en general, según las consideraciones siguientes:

- **TAMAÑO DE PARTÍCULAS Y DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA**

En general se expresa mediante una definición del tamaño máximo y del P80 (que indica el tamaño bajo el cual está el 80% del mineral apilado). Este es un parámetro obligado para diseñar las instalaciones del chancado en los proyectos, dado que la “razón de lixiviación” (o combinación de ciclo y tasa de riego) establecidos para obtener la “recuperación objetivo” está muy sensiblemente asociada a un determinado tamaño de partículas, con pérdida de recuperación si su tamaño aumenta.

- \* En la realidad, este parámetro debiera considerar además las características de las diversas rocas de un yacimiento y las cantidades de finos que ellas generan al lograr el tamaño y distribución granulométrica especificada.
- \* El P80 normalmente se deduce de pruebas de laboratorio o planta piloto, que establecen la correlación entre el tamaño de partículas y la recuperación y cinética.

\* Esencialmente es también una función económica que permite optimizar las inversiones, al comparar las inversiones de un más costoso sistema de chancado para obtener un P80 bajo, con las de instalación de pilas que resolverían la recuperación objetivo de un P80 alto, pero en una instalación mayor y algo más costosa.

- **DOSIS ESTUDIADA DE ACIDO EN CURADO**

Es usual adoptar –como máximo- una determinada previamente en pruebas de laboratorio y se reconoce la existencia de dos criterios diferentes para establecer la dosis más adecuada. El criterio usual adopta la dosis que genera la mayor recuperación de cobre en el lavado con agua de la muestra reposada, lo que normalmente coincide con inflexiones desfavorables en la curva resultante de consumo de ácido.

Otro criterio más aconsejable adopta la dosis bajo el mismo criterio, pero con la restricción adicional que no aparezca ácido sobrante en la solución. Como consecuencia, esta dosis siempre es menor y como máximo igual que la deducida por el criterio anterior, además sólo se acepta para iniciar otras pruebas pero no aún para el proyecto.

\* Aún la dosis así deducida sólo se usa en pruebas de “columnas Iso-pH” que determinan cuidadosamente el balance entre el aporte y el consumo de ácido para obtener la recuperación objetivo.

\* Con los resultados de esas pruebas de “columnas Iso-pH” se modela el contexto de una planta completa LX-SX-EW, para deducir la influencia de otros flujos que aportan ácido al sistema de lixiviación a través del refino, principalmente por descartes de electrolito para balancear sus propias impurezas.

\* En ese contexto, se calcula la diferencia entre la cantidad de ácido consumido por el mineral y la cantidad aportada al riego por el refino y se evalúa la diferencia:

- **Si la diferencia es mayor que la dosis de pruebas:** Se adopta la “dosis de prueba” y además se incorpora la diferencia de ácido al sistema en el refino o en la solución intermedia.
- **Si la diferencia es igual a la dosis de pruebas:** Sólo se adopta la “dosis de prueba”, sin incorporación adicional.
- **Si la diferencia es menor que la dosis de pruebas:** Se reemplaza la adición de la dosis de prueba por otra correspondiente sólo a la diferencia entre el consumo de ácido y el inevitablemente agregado en las soluciones de riego, con lo que se introduce el nuevo concepto de “dosis calculada” de curado.



Este caso es el más habitual y resulta en la menor de las dosis de curado recomendable.

- **Si aún la diferencia resultara negativa:** Implica que el curado tradicional debe suspenderse y reemplazarse por uno efectuado con recirculación de descarte y de refino para evitar introducir ácido fresco que des-balancearía aún más el sistema. Esta situación ocurre en algunas lixivitaciones de sulfuros con ganga poco consumidora y por efecto de la generación de ácido en el proceso.
- **Casos extremos de desbalance de ácido:** Requieren la adopción de técnicas muy especiales para aumentar el consumo de ácido del mineral, o la simple neutralización o descarte del exceso en el refino.
- \* Se procede a verificar las dosis calculadas, consumos de ácido, recuperaciones de cobre y de impurezas y de las cinéticas asociadas en nuevas pruebas de “columnas de simulación” y se corrige cualquier diferencia entre el consumo y el aporte de ácido por aproximación sistemática.
- \* Los excesos de ácido en un sistema por sobre el consumo propio del mineral se traducen muy rápido en situaciones que –a lo menos- restan eficiencia a las más caras etapas de SX y de EW a continuación, inicialmente, en espiral de la concentración de impurezas y luego por un aumento en espiral de la acidez de la solución rica.
- **DÍAS DE REPOSO SIN RIEGO, POSTERIORES AL CURADO**

Lo habitual es que sea un período variable que resulta de compatibilizar un sistema de chancado y de aglomeración relativamente continuo con la carga de los módulos, lo que ocurre en períodos que resultan más bien discretos y cada cierta cantidad de días enteros, o que entran en riego según un patrón de días similar.

  - \* Ese período resultante puede hasta verse incrementado si la estrategia operacional implica mantener módulos cargados por delante de los módulos en riego.
  - \* En los casos que este período resulta largo no se observan daños al proceso; por el contrario, sí se observan deterioros del efecto del curado si el riego se inicia antes de lo conveniente.
  - \* Según experiencias de TERRAL, la condición anterior es un claro síntoma de la influencia de las reacciones rédox para ese mineral. En todo caso, el efecto del período de reposo puede reemplazarse también por otras metodologías.

- **RAZÓN DE RIEGO PARA LA RECUPERACIÓN OBJETIVO**

La “Razón de Lixiviación” o  $m^3/TM$  de solución necesarios para los fenómenos difusionales asociados a la lixiviación, en principio se determina y/o resulta de las pruebas metalúrgicas. En la realidad práctica, ella no se calcula al definir el valor a incluir en los parámetros, sino que más bien se adopta un valor holgado desde las pruebas, para garantizar la obtención de la recuperación objetivo.

Este factor determina la duración del período de tratamiento del mineral en función de los criterios indicados, mediante cálculos auxiliares para conciliar la “Razón de lixiviación” y la tasa de riego, que definen la duración del ciclo, que a su vez establecen las superficies de pilas que luego permiten elegir la modulación de las mismas.

- \* Para detener la operación de una pila y cesar definitivamente su riego, el criterio nuevamente debiera ser económico y –como máximo- correspondería al momento en el que los costos superan a los precios de ventas.
- \* En este criterio influyen factores externos, tales como el precio del cobre y el costo del ácido; de hecho se analiza evaluando el costo de cada ganancia de recuperación, que resulta determinado principalmente por el consumo de ácido y muy poco sensible al consumo de energía a los precios vigentes.
- \* Ocasionalmente hay factores de oportunidad, como por ejemplo: la estrategia de aumentar el tonelaje tratado y sacrificar recuperación en períodos de precio elevado, para aprovechar las ganancias asociadas a una mayor producción.
- \* En todo caso, se aplican teorías de costos y beneficios marginales.

- **TASA DE RIEGO INSTANTÁNEA**

Generalmente expresada en  $l/hr/m^2$ ; ésta es una variable operacional de gran importancia e incidencia en el proceso. La tasa de riego, aplicada por el tiempo de duración del ciclo, es responsable de incorporar la “razón de lixiviación” al mineral para lograr la “recuperación objetivo”.

- \* Tasas de riego altas requieren una mayor “razón de lixiviación” que las bajas para lograr la “recuperación objetivo” Las tasas altas presentan la ventaja de un tiempo del ciclo más corto y como desventaja una menor concentración de las soluciones efluentes y mayor consumo de energía por el aumento de la “razón”.
- \* En general las tasas se establecen a partir de pruebas de inundación y de humedades dinámicas (o pasantes) a varias tasas de riego efectuadas en el laboratorio, que se ratifican en pruebas de lixiviación en columnas (que no siempre son adecuadamente interpretadas en este contexto).

- **% DE TIEMPO DE RIEGO (SI CICLOS PULSANTES).**

El sistema pulsante es prácticamente indispensable en la lixiviación de sulfuros, sea para contribuir a la alteración de las especies o para los requerimientos de oxígeno de las bacterias.

Según los conceptos de TERRAL, que usualmente adopta irrigación con pulsos de riego (para aportar reactivos) y de reposo (para extraer productos a prácticamente todos los minerales), la forma de aplicar la solución de riego incide en la eficiencia de la “razón de lixiviación”, cuyo valor entonces resulta dependiente de la tasa de riego. En consecuencia existe una “tasa instantánea”, durante la fase de aplicación, y una “tasa promedio” resultante del ciclo completo.

- \* En los conceptos de TERRAL, aún en la lixiviación de óxidos participan reacciones rédox que hacen conveniente períodos de oxigenación (en los reposos), sea para:
  - . oxidar y destruir reductores ocasionalmente presentes que afectan la recuperación y la cinética.
  - . oxidar y destruir arcillas intercambiadoras iónicas ocasionalmente presentes y con los mismos efectos anteriores.
  - . disminuir los consumos de ácido y ajustar la presencia de impurezas mediante mecanismos asociados al par  $Fe^{+2}$  y  $Fe^{+3}$ , que requieren de oxígeno.
- \* Las oxidaciones ocurren más eficazmente por la inducción de aire a las pilas para una reacción “fase gaseosa - fase sólida” directa sobre la impregnación de la roca húmeda después del estruje de un reposo, mientras que durante el riego la baja solubilidad del oxígeno en las soluciones que cubren la superficie de las partículas las limitan.
- \* La secuencia de pulsos está controlada por el reposo, que dura sólo el tiempo que resulta eficiente. Tal duración está relacionada con el tiempo necesario para estrujar las soluciones y eliminar la película líquida sobre las partículas para exponerlas a la fase gaseosa.
- \* Este período se determina experimentalmente en laboratorio y depende de: la “tasa de riego instantánea” aplicada, de la altura de la pila, de la distribución granulométrica del mineral, del uso de surfactantes y del tiempo adicional para las reacciones “fase gaseosa - fase sólida” en las superficies de las partículas.
- \* Los tiempos de riego se procura que sean breves y a la mayor “tasa instantánea” posible, pero que evite problemas de inundación durante su período de aplicación.

- \* Ambos períodos de riego y de reposos se reducen a tiempos compatibles con la operación y resultan habitualmente en días completos de reposo y de riego, que no necesariamente son los mismos.
- \* Los períodos de riego y de reposo se compatibilizan con la disponibilidad de módulos que se transforman en múltiplos de estos ciclos; por ejemplo: si los períodos de riego de reposo son iguales, deben ser pares tanto la cantidad total de módulos como la cantidad que genera solución rica o intermedia y la cantidad que se riega con refino.

- **ALTURA DE APILAMIENTO**

Esta es una función principalmente económica, dado que el costo de cargar el mineral es directamente proporcional a la altura de la pila, factor que crece a una tasa mayor que el costo de cargar en superficie. La altura de pilas está también indirectamente asociada al tamaño de la explotación.

La altura está condicionada por la disponibilidad de espacio y una superficie menor conduce a pilas altas para aprovecharla. En sistemas de riego en que toda la pila se riega sólo con refino, la altura del apilamiento combinada con la tasa de riego son prácticamente los únicos medios para ajustar la concentración de cobre de la solución rica.

- \* El tamaño de la explotación puede demandar medios más o menos costosos para efectuar la carga de la tasa requerida de mineral; en general:
  - Explotaciones pequeñas (en el orden de hasta 1000 TPD) usan cargadores, cuya capacidad de de alcance en altura limita en el orden de 3 –3,5 m, como máximo y según el tamaño del equipo.
  - Explotaciones intermedias (probablemente hasta el orden de 5 a 10.000 TPD) adoptan apiladores móviles del tipo stacker con correa de descarga de ángulo horizontal variable. Estos equipos son cargados desde camiones y alcanzan alturas en el orden de 6 - 8 metros.
  - Explotaciones de grandes adoptan sistemas de correas de distinto tipo; por ejemplo “Grass-hoppers” (tren de correas cortas que reciben mineral aglomerado-curado, lo traspasan entre ellas y alimentan el dispositivo final de carga de pilas), o sistemas “Takraft” (que depende de una sola correa de alimentación a un sistema móvil y que también dispone de roto-pala para remover el ripio y liberar espacio.

- . Las explotaciones de minerales marginales en condición “Run off mine” (ROM) se cargan desde la superficie por volteo de camiones, usualmente seguido por “ripeno” de la superficie para restituir permeabilidad.
  - \* La altura de carga se asocia con la duración del ciclo a través de la tasa de riego, dado que entre ambas definen el tiempo de riego para suministrar la “razón de lixiviación”
  - \* La altura también se correlaciona con la forma de oxigenar la pila (cuando se requiere). La práctica muestra que hasta 3 – 3,5 metros no es necesario inyectar aire a presión para oxigenar las pilas, mientras que alturas superiores sí lo necesitan.
- **DOSIS DE LÍQUIDO PARA AGLOMERAR MINERAL**

Generalmente se establece en el orden del 70 al 80% de la humedad de impregnación determinada en pruebas de laboratorio, cantidad a la que se resta la humedad natural o la remanente luego de los sistemas de contención de polvo del chancado y el volumen equivalente del ácido agregado.

- \* Algunas empresas adoptan pruebas empíricas para comparar más objetivamente la calidad del aglomerado con varias dosis de agua y sus características mecánicas.
- \* En el caso de curados “in situ”, como los aplicados en la lixiviación de minerales marginales en condición ROM, no sólo es importante la dosis sino que también la forma de aplicarla para garantizar que ella impregne efectivamente la roca sin escurrimiento al drenaje.
- \* Cabe mencionar que en varias empresas se ha comenzado a reemplazar el agua por refino por diversas razones. Es una tendencia que se extenderá ya que presenta varias ventajas metalúrgicas, asociadas a los efectos de su contenido de fierro sobre el mineral en esta fase del tratamiento.

- **CONSUMO TOTAL DE ACIDO DEL MINERAL (PARA % RECUPERACIÓN)**

El consumo total de ácido del mineral para lograr la “recuperación objetivo” mediante las reacciones químicas con las especies; es cubierto parcialmente por el equivalente de ácido, del cobre extraído de las soluciones ricas en las etapas de extracción de la planta SX.

Concuerda con el “Consumo neto”, que corresponde exclusivamente al consumo de la ganga en (kg ácido/TM) y que es el ácido fresco externo agregado al sistema completo LX-SX-EW que se contabiliza en los costos de operación. También concuerda con el “Consumo específico” de ácido fresco en (kgácido/kgCu lixiviado), que es otra forma de expresar el concepto anterior, pero esta vez referido al cobre extraído del mineral.

- \* Nuevamente, el consumo total y sus asociados no son un parámetro, sino características que se reseñan en los criterios de diseño.
- \* Corresponde al consumo total de ácido que equilibra la demanda de la lixiviación, en un escenario dado de procesos.
- \* El consumo puede ser manipulado mediante metodologías especiales para ajustar las características de la solución rica, pero ello debe ensayarse y verificarse en la etapa de pruebas metalúrgicas.

- **CANTIDAD DE MÓDULOS INSTALADOS**

Como consecuencia de la cantidad requerida de mineral, la altura del apilamiento adoptada y los ángulos de reposo del mineral (naturales o artificiales) se define la superficie total de pila en operación para el tratamiento del mineral.

- \* Normalmente la pila se subdivide en módulos (o parcelas, o pads, o simplemente pilas).
- \* Según los enfoques habituales, la cantidad de pilas es una función relacionada con la sub-división más o menos arbitraria del ciclo de lixiviación, o con los días de carga y preparación y ciclos de tratamiento de la pila.
- \* Según los enfoques de TERRAL, la superficie unitaria depende de la cantidad de módulos demandados por los ajustes de concentración requeridos por la concentración de cobre en la solución rica establecida como objetivo, a partir de la combinación de los efluentes de los módulos, con minerales en diversos grados de avance de la lixiviación.
- \* Consecuentemente con esta metodología, se define simultáneamente: la cantidad típica de módulos que generan solución rica, los que se riegan con refinó y los que generan y/o re-circulan solución intermedia.
- \* En este caso la superficie de cada módulo será la superficie total dividida por la cantidad de módulos en operación.
- \* Las dimensiones de cada módulo (y en consecuencia las de la pila total) se eligen posteriormente conciliando diversos factores condicionantes, uno de los cuales puede ser el factor controlante. Los principales factores condicionantes son:
  - La topografía de la superficie disponible.
  - Las características del sistema o método de carga de mineral, que a veces establecen una de las dimensiones (por ejemplo: los apiladores establecen el criterio de elección del ancho).

- La disposición hidráulica del sistema de riego, desde el punto de vista de garantizar la uniformidad de presiones en los emisores para lograr tasas de riego uniformes y también desde el punto de vista de conciliar las áreas cubiertas por aspersores que es el caso más complejo de ajustar.

- **CONCENTRACIÓN MÁXIMA DE IMPUREZAS EN SOLUCIÓN RICA**

La concentración de impurezas (generalmente: exceso de ácido, fierro y cloruros) en la solución rica se deduce a partir de cálculos basados en los aportes del mineral (medidos en las pruebas metalúrgicas) y en los del agua industrial, y no descartados en la impregnación del ripio abandonado, considerando además su concentración por evaporación de agua en las pilas.

- \* Su concentración no es necesariamente el valor medido en las pruebas, dado que en ellas es difícil alcanzar el estado de régimen estacionario.
- \* En general, las impurezas totales se miden a través de la concentración total de sulfatos en las soluciones circulantes. Medidas indirectas se obtienen de la viscosidad y densidad de las soluciones.
- \* Su concentración es función del ácido suministrado a la lixiviación y se controla por este medio, aún a expensas de la cinética del proceso.
- \* Su presencia descontrolada tiene efectos negativos en la misma lixiviación y en la eficiencia de los procesos de SX y EW a continuación.

- **DESCARTE DE REFINO DE PLANTA COMPLETA**

Esta es una condición completamente indeseada, provocada por el descontrol de la presencia de impurezas y por el fracaso de las medidas para controlar su presencia. Debe disponerse de pozos de evaporación si se prevé su necesidad,.

- **CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO LIBRE EN LA SOLUCIÓN RICA**

La presencia de ácido en la solución rica afecta la eficiencia de la planta SX tanto por sí misma como por a la presencia de impurezas que siempre la acompaña.

- \* Corresponde a una decisión del propietario, pero la posibilidad y formas de lograrlo deben verificarse previamente en pruebas metalúrgicas.
- \* Aunque los medios de control de su concentración frecuentemente llevan a un deterioro de la cinética, el costo de resolver sus efectos es más alto que las pérdidas causadas por la prolongación del ciclo, que incluso puede además mejorar la recuperación y bajar el propio consumo de ácido.



- **CONCENTRACIÓN DE COBRE EN LA SOLUCIÓN RICA**

Es un parámetro de la mayor importancia económica ya que redundando en el tamaño de las instalaciones de la planta SX, que se diseña en función del caudal de esta solución.

Este es un parámetro objetivo directamente asociado prácticamente a todos los factores ya mencionados y cuya forma de lograrla deben verificarse previamente en pruebas metalúrgicas, para comprobar que la combinación adecuada de las cinéticas de recuperación de cobre e impurezas y de consumo de ácido permite lograrla.

- \* La concentración resulta de la configuración del manejo de las soluciones, que mediante la generación y recirculación de alguna solución permiten ajustar al mismo tiempo la “razón de lixiviación” con la “razón de concentración” que se corresponde con la concentración deseada de la solución rica.
- \* Otros factores relacionados con su logro corresponden a la modulación del apilamiento y tamaños de cada unidad, a la tasa de riego y a la altura de pilas, que se combinan de modo que permitan alcanzarla.
- \* Las variaciones de las características del mineral son absorbidas mediante el manejo de la solución que recircula, cuya capacidad de bombeo debe ser holgada para adaptarse a los casos extremos del comportamiento de los minerales.

- **TASA DE CONSUMO DE AIRE DE LA LIXIVIACIÓN**

Expresado como  $m^3N/h/TM$ , es un parámetro que sólo recientemente se comienza a considerar en los proyectos con el objeto de satisfacer los requerimientos de oxígeno de las reacciones de óxido-reducción en la lixiviación, incluidas las demandadas por las bacterias en las lixivitaciones de sulfuros

- \* Los valores requeridos aún no están bien establecidos, pero se usan en el orden de  $0,02 m^3N/h/TM$ , agregados durante los esquemas de riego continuo.
- \* Las pilas bajas (3,5 metros de altura o menos) parecen oxigenarse por sí solas por el leve vacío generado al detener el riego y drenar las soluciones, en los sistemas de riego pulsantes.
- \* Para las pilas más altas sí es incidente la inyección externa de aire.
- \* Existen estudios que muestran que en general, son efectivas dosis menores a las usadas y que es más eficiente la inyección de aire durante las fases de reposo de los riegos pulsantes debido a que la acción del oxígeno no está limitada por su baja solubilidad en las soluciones. La disposición de los medios para la inyección del aire es de gran importancia y no está completamente resuelta.

## 10. MODELACION DE PRUEBAS Y DISEÑO DE LA LIXIVIACION DEL PROYECTO CON LOS PARAMETROS Y CRITERIOS ADOPTADOS

Esta etapa se realiza con ayuda de un programa de cálculo iterativo en plataforma Excell que se adjunta. Ella es un "sub-conjunto" de otra completa destinada a cálculos de las áreas chancado, aglomeración, SX, EW, estanques y servicios, que están fuera de los alcances de este curso.

Las decisiones de esta etapa no necesariamente conducen a una solución única, sino que permiten que el diseñador adopte algunas decisiones libremente, de acuerdo con la realidad de su proyecto. En este contexto, es muy probable que convenga usar el programa con un buen criterio que le permita "tantear" el uso de un valor (p. ejemplo: al establecer la altura del apilamiento o la organización de los módulos de la pila), observar las consecuencias del valor adoptado (p. ejemplo: sobre la demanda de espacio o sobre las concentraciones de la solución rica) para luego intentar otros valores que resulten más satisfactorios.

### 10.1 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El programa contiene las siguientes "hojas de cálculo":

- **BALANCE DE MASAS**

En ésta hoja se incorporan los datos, parámetros y criterios que inciden en el balance de masas y en la configuración del proyecto y se realizan los cálculos que resultan de ellos. Esta es la única hoja que se utiliza para diseñar los pruebas de columnas modeladas y de verificación y a su vez muestra los siguientes sectores:

- \* **Sector de Parámetros y Criterios** : Con la data del proyecto.
- \* **Sector de Ajustes e iteraciones** : Es el sector principal de la planilla, donde se concilian por iteración los valores adoptados en el sector anterior.
- \* **Sector de Cálculos** : Programado a partir de los sectores anteriores para calcular los valores que resultan de ellos, algunos de los cuales los retroalimentan como "referencias" para ratificar su aplicación y conciliación entre sí.
- \* **Sector de Tablas de Resumen** : Que clasifica en orden los datos y resultados para presentarlos.

- **CONFIGURACIÓN DE PILAS**

En esta hoja se completan los cálculos de configuración de los módulos de la pila, a partir de enlaces con la hoja anterior y con datos externos de los medios de riego adoptados.

Calcula los módulos en forma conciliada con los caudales y superficies establecidos para que estos sean cumplibles en la práctica, con los medios de riego elegidos. Esta hoja presenta un diagrama para revisión de las dimensiones que resultan.

La hoja también dispone de un sector que permite estudiar la estrategia del aplilamiento del recurso total a lixiviar en un terreno dado, a partir de la conciliación entre las dimensiones adoptadas de los módulos y el terreno disponible con su topografía particular, que probablemente debería ser corregida con los movimientos de tierra que sean factibles.

- **CRITERIOS DE PROCESOS**

En esta hoja sólo se resumen los criterios de proceso adoptados en las hojas de cálculos anteriores para efectos de presentación, prácticamente no se efectúan nuevos cálculos en ella. Los textos descriptivos son sólo orientadores y deben ajustarse a la realidad de cada proyecto.

- **LISTADO DIMENSIONADO**

En esta hoja se efectúan los cálculos simplificados de dimensionamiento de las partidas presupuestarias de obras y equipos que corresponden a la implementación del proyecto, a partir de enlaces con las hojas anteriores más la data de cada caso.

Su llenado es de responsabilidad de la especialidad de procesos o del metalurgista, que puede recurrir a las otras especialidades de ingeniería, y su objetivo es simplemente informar a las especialidades acerca de la implementación en un contexto unitario y conciliado, para que cada una desarrolle sus cálculos detallados y específicos dentro de este marco general.

El cálculo de los equipos permite calcular los consumos de potencias instaladas y el de las dimensiones de las obras civiles e instalaciones permiten trazar las primeras disposiciones de planta. A partir de entonces, esta hoja es más bien un instrumento de coordinación.

- **HOJAS: "DATOS BASE", "MÓDULOS VS. TIEMPO" Y "PUESTA EN MARCHA"**

Destinadas a calcular las demandas de insumos, crecimientos de inventarios y condiciones del "período transiente" de la puesta en marcha y hasta la entrada en régimen. En este curso sólo se las presenta y describe su uso.

## 10.2 CÓDIGOS DE LA PLANILLA:

La "arquitectura" del archivo permanentemente utiliza los códigos generales de los archivos Excel de TERRAL, que se describen a continuación:

- **Números Azules Remarcados:** Indican que esos datos se introducen manualmente bajo la iniciativa de cada responsable encargado de llenarlos en su sector de las planillas. Corresponden a:
  - \* *Instrucciones externas;* Por ejemplo, por decisión del propietario.
  - \* *Datos medidos;* Por ejemplo en pruebas o al levantar la topografía del área.
  - \* *Valores de algún criterio aplicable.*
- **Números azules sin remarcar:** Indican datos que se introducen automáticamente desde alguna otra hoja de la planilla en la que se les generó. Esencialmente son datos para la serie de cálculos, pero provenientes de otra hoja o de otro sector. Su objetivo es evitar errores de traspaso de información y mantener absolutamente coordinados los antecedentes del proyecto, cuando sufran modificaciones. **LAS CELDAS QUE LOS CONTIENEN NO DEBEN SER INTERVENIDAS PARA CAMBIAR LOS ENLACES SIN AUTORIZACIÓN.**
- **Números Rojos Remarcados:** Indican datos introducidos manualmente por el encargado de llenarlos en su sector de la planilla, pero que provienen de fuentes externas e independientes de la experiencia directa. Corresponden a:
  - \* *Instrucciones externas;*
  - \* *Data de proveedores externos de equipos;*
  - \* *Resultados que merezcan dudas y ameriten revisión;* en este caso, la celda también se remarcará con un fondo de color el que se removerá una vez aclarada la fórmula y/o corregido el cálculo.
- **Números negros sin remarcar:** Indican cálculos a partir de instrucciones, datos y cálculos intermedios mediante fórmulas ya integradas en la planilla.
- **Números Negros Remarcados:** Ídem anterior, pero reservados para resultados relevantes que deben revisarse con atención por quien corresponda:
- **Números verdes sin remarcar:** Indican data proveniente por enlaces desde pruebas metalúrgicas aplicables a los cálculos.
- **Números verdes remarcados:** Identifican las celdas con fórmulas lógicas.

### 10.3 MANEJO DE LA PLANILLA

Es muy difícil de describir por las múltiples opciones de uso de cada una de las hojas de la planilla y se procede mediante un tutorial con ejercicios asistidos por un guía, para practicar su uso en el contexto que corresponda a la aplicación en curso.

Las dificultades típicas en el uso de las hojas son:

- **BALANCE DE MASAS**

- \* **Sector de Parámetros y Criterios:**

- i. Llenado de la data enlazada desde pruebas informadas en otras planillas externas.
    - ii. Incorporar la data de configuración del proyecto, las que considera antecedentes desde su implementación subyacente.
    - iii. Definir las características deseadas el PLS en un contexto que sea alcanzable.

- \* **Sector de Ajustes e iteraciones:**

- i. Elegir el contexto de modelación adecuado y sin sesgos y con respeto de las restricciones externas que no puedan corregirse
    - ii. Conciliar la data incorporada (**en azul remarcado**) con las referencias que la validan (**en rojo sin remarcar**) mediante las iteraciones que las ajustan.
    - iii. Reincorporar data de configuración del proyecto en forma conciliada, cuando las referencias indiquen que se necesitan cambios.

- \* **Sector de Cálculos:** Se llena automáticamente y genera las referencias para el sector de ajustes. Sólo requiere de revisión para verificar que sean satisfactorios.

- \* **Sector de Tablas de Resumen:** Se llena automáticamente y genera los valores de diseño para la hoja de dimensionamiento. Sólo requiere de revisión para verificar que sean satisfactorios.

- **CONFIGURACIÓN DE PILAS:**

- i. Selección de los medios de riego (aspersores y goteros) que satisfagan las tasas de riego y las dimensiones preliminares, hasta concluir en las definitivas conciliadas.
    - ii. Incorporar la data de topografía y de disposición y la conciliación entre ambas, que puede requerir re-cálculos para ajustarlas sistemáticamente.

- **CRITERIOS DE PROCESOS:**

Esta hoja se llena automáticamente y genera los valores para informarlos. El llenado de los textos descriptivos demanda buena redacción resumida.

- **LISTADO DIMENSIONADO:**

i. En realidad cada partida presenta sus propias dificultades ya que demanda una relativamente alta experiencia para elegir las configuraciones y valores. Ayuda mucho la disponibilidad de buen acceso a datos y asesores sobre temas externos.

ii. Considerar que cada ítem tiene un significado en términos de demanda de espacio y de conectividad hidráulica, eléctrica e instrumental que deseablemente deben quedar consideradas desde el comienzo para evitar el exceso de rondas de cálculo.

- **HOJAS: "DATOS BASE", "MÓDULOS VS. TIEMPO" Y "PUESTA EN MARCHA":**

Implica una gran capacidad de coordinación de la variable tiempo y del control de los abastecimientos externos, ya que el factor controlante de la secuencia de actividades cambia constantemente.

#### 10.4 SECUENCIA DE MANEJO

La planilla en realidad está confeccionada y representa una "calculadora programada" que se debe usar correctamente para llegar a las respuestas buscadas. Dada su concepción iterativa es importante seguir la secuencia indicada para evitar la repetición de pasos para corregir errores de este orden:

- \* **FASE 1:**

Anotar en la "zona de parámetros" los enlaces de las celdas con los datos desde las pruebas metalúrgicas (**en verde sin remarcar**).

- \* **FASE 2:**

Anotar en la "zona de parámetros" los valores de los parámetros básicos (**en azul remarcado**) y las referencias que los validan (**en rojo sin remarcar**).

- \* **FASE 3:**

Anotar en la "zona de ajustes" los parámetros que requieren ajustes bajo los criterios de configuración (**en azul remarcado**) observando las referencias que los validan (**en rojo sin remarcar**). Dado que los ajustes interactúan entre sí y con las referencias y parámetros, se requieren iteraciones sucesivas.

- \* **FASE 4:**

Revisar los cálculos y resultados y, si es necesario, repetir el proceso hasta ajustar los objetivos.